

Realisierung eines satellitengestützten Kommunikations- Testsystems

Diplomarbeit

im Studiengang Nachrichtentechnik



FACHHOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND
WIRTSCHAFT BERLIN

Fachbereich I
Ingenieurwissenschaften I



DEUTSCHES ZENTRUM FÜR
LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.

Institut für Robotik und Mechatronik
Einrichtung Optische Informationssysteme

eingereicht von:	Andreas Speter
geboren am:	10.05.1978
Matrikel-Nr.:	512842
Studiengang:	Nachrichten-/ Kommunikationstechnik

Betreuer der Fachhochschule:	Prof. Dr.-Ing. Joachim Meißner Prof. Dr.-Ing. Gerwin Kantelberg
betrieblicher Betreuer:	Dipl.-Ing. Axel Lauterbach

Berlin, 05.01.2009

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.	1
1.2	Motivation und Ziel der Arbeit	2
1.3	Gliederung der Arbeit	3
2	Grundlagen	4
2.1	Anforderungen an das Testsystem	4
2.2	Angaben zur Hard- und Software	5
2.3	Grundlagen der Modulation	8
2.3.1	Notwendigkeit einer Modulation	8
2.3.2	Angewandte Modulationsverfahren	9
2.3.3	Phasentastung (PSK)	10
2.3.4	Phasenmodulation (PM)	14
3	Simulation	19
3.1	Verwendete Module in der Simulation	20
3.2	Sender	25
3.2.1	Blockschaltbild	25
3.2.2	Frontpanel	28
3.3	Empfänger	30
3.3.1	Blockschaltbild	30
3.3.2	Frontpanel	33
4	Realisierung des Testsystems	35
4.1	Sender (Uplink)	35
4.1.1	Zusammenfassung der Anforderungen	36
4.1.2	Technisch bedingte Einschränkungen der Anforderungen	37
4.1.3	Frontpanel (GUI) und Funktionsbeschreibung	37
4.1.4	Blockschaltbild	40

4.2	Empfänger (Downlink)	50
4.2.1	Zusammenfassung der Anforderungen	50
4.2.2	Technisch bedingte Einschränkungen der Anforderungen	51
4.2.3	Frontpanel (GUI) und Funktionsbeschreibung	51
4.2.4	Blockschaltbild	53
5	Zusammenfassung und Ausblick	55
	Abbildungsverzeichnis	57
	Literaturverzeichnis	60
A	Anhang	61

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AW	arbitrary waveform
AWGN	additive white gaussian noise
BER	bit error rate
BIRD	bispectral infra-red detection
BPSK	binary phase shift keying
CW	continues waverform
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EGSE	electrical ground support equipment
FM	Frequenzmodulation
GUI	graphical user interface (Grafische Benutzer Oberfläche)
HF	Hochfrequenz
IF	intermediate frequency (Zwischenfrequenz
IQ	In-Phase / Quadratur-Phase
NI	National Instruments
NRZ-L	non return to zero - level
PCI	peripheral component interconnect
PLL	phase lock loop (Phasen-Regelschleife)
PM	Phasenmodulation
PSK	phase shift keying
PXI	PCI eXtension for instruments
QPSK	Quadratur PSK
TCP-IP	transmission control protocol/internet protocol
TET	Technologieerprobungsträger-Satelliten
VCO	voltage controlled oszillator (spannungsgesteuerter Oszillator)
VI	Virtuelles Instrument

Formelzeichen

$\Delta\varphi_C$	Phasenhub
Δf_C	Frequenzhub
η	Phasenhub in rad
ω_C	Kreisfrequenz des Trägers
$\varphi_C(t)$	Nullphasenwinkel
$\varphi_{Cw}(t)$	Signalabhängiger Wechselanteil
A	Amplitude
$d(t)$	Binärdaten
f_B	Symbolrate
$f_M(t)$	Momentanfrequenz
f_S	Basisband-Frequenz
f_{Cw}	Wechselanteil der Momentanfrequenz der Winkelmodulierten Schwingung
$s_C(t)$	Trägersignal
$s_M(t)$	Modulationssignal
$s_S(t)$	Basisbandsignal

1 Einleitung

1.1 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in der Helmholtz Gemeinschaft ist ein nationales Forschungszentrum der Bundesrepublik Deutschland. Es beschäftigt ca. 5300 Mitarbeiter in 28 Instituten und Einrichtungen an 8 nationalen Standorten und unterhält Außenbüros in Brüssel, Paris und Washington, D.C. Als Raumfahrt-Agentur im Auftrag der Bundesregierung ist das DLR für die Planung und Umsetzung der deutschen Raumfahrtaktivitäten sowie für die internationale Interessenwahrnehmung verantwortlich. Neben der Erforschung von Erde und Sonnensystem betätigt sich das DLR auf den Gebieten Verkehr und Energie. Das Bestreben liegt dabei im Erhalt der Umwelt und der Entwicklung umweltverträglicher Technologien zur Steigerung von Mobilität, Kommunikation und Sicherheit. Die Aktivitäten umfassen sowohl die Grundlagenforschung als auch die Entwicklung innovativer Lösungen von morgen. Das dabei gewonnene Wissen fördert den Industrie- und Technologiestandort Deutschland [DLR07].

Die Einrichtung „Optische Informationssysteme“ am Institut für Robotik und Mechatronik in Berlin-Adlershof beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Entwicklung und Schaffung intelligenter optischer Informationssysteme. Diese Systeme kommen unter anderem auch bei dem Projekt BIRD zum Einsatz. BIRD benutzt die neue Kleinsatellitententechnologie und dient zur Erprobung einer neuen Generation von Infrarotsensoren im Weltraum.

1.2 Motivation und Ziel der Arbeit

Der Bau von Kleinsatelliten spielt bei der Entwicklung und Erprobung neuer Technologien eine entscheidende Rolle. Die Vorteile dieser Satellitensysteme liegen vor allem darin, dass sie im Vergleich zu kommerziellen Satelliten eine kompakte und einfache Bauweise besitzen.

Das Gewicht von nur 100 kg und die Abmaße von 650 mm x 550 mm und einer Höhe von 880 mm ermöglichen die Mitnahme dieser Satelliten beim Transport größerer Satelliten. Bei diesem sogenannten Piggyback Verfahren wird der wesentlich kleinere Satellit als weitere Nutzlast mitgenommen. Dies führt zu erheblicher Kostenersparnis in der Erprobung neuer Technologien.

Einer dieser Kleinsatelliten ist BIRD (Bispectral Infra-Red Detection), welcher am DLR-Standort Berlin Adlershof entwickelt wurde.

Auf Basis von BIRD wird ein Technologieerprobungsträger-Satellit (TET) entwickelt. Dieser stellt das Grundsystem des Satelliten zur Verfügung und eine Schnittstelle für verschiedene Nutzlasten, sogenannte Payloads, wie zum Beispiel neue Kamerasysteme. Das maximal Gewicht der Nutzlast beträgt 50 kg. Der TET-Satellit stellt einen universellen Träger für Technologien zur Verfügung. Der Aufbau und die Komponenten für TET werden zum Großteil von BIRD übernommen. Dadurch werden Kosten minimiert und sichergestellt, dass die Zuverlässigkeit und die Verifikation des BIRD-Busses erhalten bleiben.

Bei der Entwicklung bzw. bei der späteren Montage der Komponenten des Satelliten müssen diese ausführlich getestet werden. Gerade bei extern gefertigten Komponenten ist es unerlässlich, einen Wareneingangstest durchzuführen. Es werden zunächst alle Komponenten einzeln mehreren Tests unterzogen, wie zum Beispiel einem Rütteltest zur Erfassung des Verhaltens der Bauteile bei Resonanz der Rakete beim Start oder einem Test der Wärmeableitung im Vakuum. Als Schnittstelle für diese Tests dient das EGSE (Electrical Ground Support Equipment).

Das EGSE ist das zentrale Element in den einzelnen Ausbaustufen während der Entwicklung des Satelliten. Es bietet ein flexibles Interface, um mit den Komponenten während der Entwicklung zu kommunizieren oder um Daten aufzuzeichnen. Des Weiteren bietet es die Möglichkeit, Komponenten, welche noch nicht zur Verfügung stehen, zu simulie-

ren.

Viele Tests, vor allem der Test von Einzelkomponenten, sind über Datenkabel möglich, jedoch bei einigen Tests ist es nicht möglich, mit dem Satelliten über Kabelverbindung zu kommunizieren, zum Beispiel bei späteren Lagetests. Dazu ist die Kommunikation über die Sende- und Empfangseinrichtung des Satelliten notwendig. Beim BIRD wurde zu den extern gefertigten HF-Komponenten (Sender und Empfänger) zusätzlich die Hardware für das EGSE teuer eingekauft. Diese Testkomponenten können nur für einen Satelliten genutzt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Realisierung eines Systemes, welches leicht an andere Satelliten-Projekte anpassbar ist. Im Rahmen der Entwicklung des TET-Satelliten, welcher in Kooperation mit der Industrie durchgeführt wird, ist es notwendig, ein System zur Kommunikation während der Test- bzw Entwicklungsphase auf dem Boden zu realisieren. Da dieses System auch für spätere Projekte erhalten bleiben soll, ist es erforderlich, es möglichst flexibel zu gestalten.

Es muss in der Lage sein, mit dem kompletten Testsystem, dem EGSE, zu kommunizieren, Telekommandos an den Satelliten weiterzugeben und Telemetrie zu empfangen.

1.3 Gliederung der Arbeit

Im Kapitel 2 wird die Anforderungen an das System erfasst und genauer erläutert. Die verwendete Hard- und Software wird vorgestellt und es wird theoretisch auf die verwendeten Modulationsarten eingegangen.

Im Kapitel 3 werden anhand der Simulation einige Module der Software genauer vorgestellt. Die Simulation dient in erster Linie der Gewinnung eines Überblicks über die Software und deren Erweiterungen, wie zum Beispiel des Modulations-Toolkits.

Das Kapitel 4 erläutert die Umsetzung der simulierten Programme in die Hardwareumgebung.

Die Diplomarbeit schließt mit einer zusammenfassenden Bewertung und einem Ausblick.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Anforderungen an das Testsystem dargestellt. Die verwendete Hard- und Software wird vorgestellt und es wird kurz auf die theoretischen Grundlagen der angewandten Modulationsarten eingegangen.

2.1 Anforderungen an das Testsystem

Wie bereits aus dem Kapitel 1.2 zu entnehmen ist, soll das System eine Funkkommunikation zwischen Satelliten und EGSE ermöglichen. Zur Realisierung müssen zunächst die genauen Spezifikationen zum HF-System des Satelliten erfasst werden. Als Referenz hierfür dient das Dokument zur Beschaffung des HF-Systems. In diesem Dokument sind die nötigen Informationen zusammengefasst.

Der Sender des Testsystems muss bei einer Frequenz von $2032,5\text{MHz}$ im S-Band Telekommandodaten übertragen. Dazu werden die digitalen Signale (Telekommandos) mit Hilfe einer binären Phasentastung (BPSK - binary phase shift keying) auf einen 16kHz Unterträger moduliert. Anschließend wird dieser Unterträger mit Hilfe einer Phasenmodulation (PM) auf die gegebene Sendefrequenz moduliert. [Gmb08]

Spezifikationen für die Modulationen:

- Die BPSK wird mit einer Symbolrate von 4kHz (4kpbs) auf einen Unterträger von 16kHz moduliert.
- Der Modulationsindex für die PM ist $1,25\text{ rad}$ ($71,62^\circ$).

Um eine Verbindung zum Satelliten aufbauen zu können, muss dieser eingeloggt sein. Dazu wird, sobald der Satellit im Sichtbereich der Bodenstation ist, ein konstanter, unmodulierter Träger gesendet. Als Ausgleich des Dopplereffektes wird mit diesem unmodulierten Träger am Anfang der Verbindung ein Frequenzhub abgefahren, auf welchen sich der Satellit synchronisiert.

Um den Träger wird mit einer Geschwindigkeit von $50kHz/s$ ein Frequenzdreieck mit $\pm 60kHz$ durchlaufen. Ist der Satellit auf einer Frequenz eingeloggt, gleicht er automatisch den Dopplereffekt aus und gibt über seine Housekeeping Daten eine Rückmeldung an die Bodenstation. Die Housekeeping Daten beinhalten unter anderem Informationen zur Lage und zum Status des Satelliten.

Da unter Laborbedingungen kein Dopplereffekt entsteht und der Test dieser Funktion nicht zu den Kriterien des Testsystem gehört, muss dies nicht berücksichtigt werden. Es wird ein konstanter unmodulierter Träger gesendet, auf welchen sich der Empfänger des Satelliten einloggen soll.

Die zu sendenden Kommandos werden bei Bedarf auf diesen Träger moduliert. Vor und nach jedem Telekommando muss eine Sequenz „IDLE“ vorhanden sein mit einer Mindestlänge von 8 Byte und dem Format $x55_{hex}$. Nach der ersten „IDLE“ Sequenz muss eine Synchronisationssequenz mit einer Länge von 16 Bit eingefügt werden. Das komplette vereinfachte Telekommando ist in Abbildung 2.1 zu sehen.

IDLE	Sync.	Telekommando
-------------	--------------	---------------------

Abbildung 2.1: Telekommando Format

Der Empfang von Telemetriedaten erfolgt bei einer Frequenz von $2201,707MHz$. Das empfangene Passbandsignal ist BPSK moduliert. Als Leitungscode wird der NRZ-L (non return to zero - level) verwendet. Die Telekommandos werden mit zwei verschiedenen Datenraten empfangen:

- Langsame Übertragung (low rate) von $137,5kBit/s$, für Housekeeping. Empfang in jeder Lage des Satelliten möglich.
- Schnelle Übertragung (high rate) von $2,2MBit/s$, zum Senden von Daten, Ausrichtung des Satelliten notwendig, Richtantenne.

2.2 Angaben zur Hard- und Software

Die verwendete Hardware ist ein PCI eXtension for Instruments (PXI) - System der Firma National Instruments (NI).

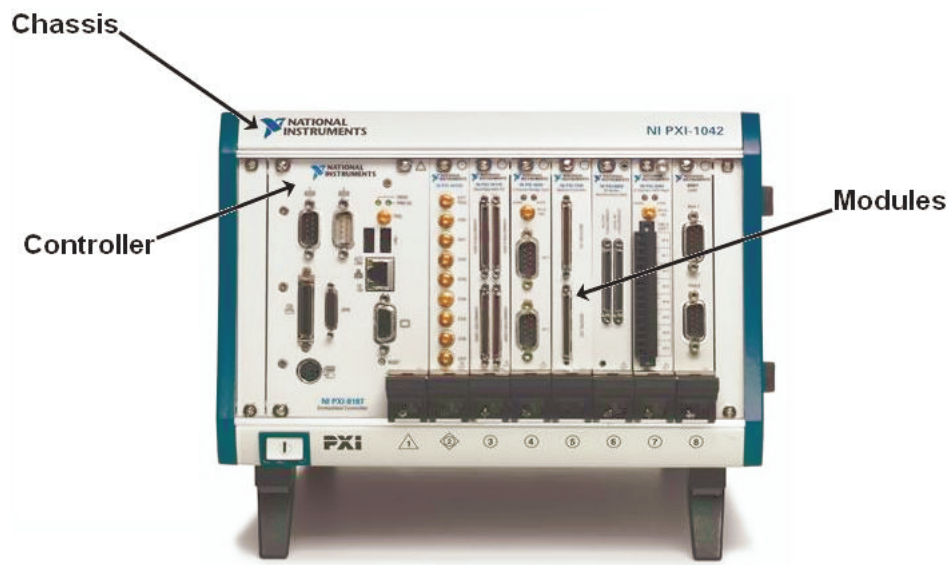


Abbildung 2.2: PXI - System

„PXI kombiniert die Leistungsmerkmale des elektrischen Busses PCI im mechanisch solide konstruierten, modularen CompactPCI-Chassis im Eurocard-Format mit speziell für die Synchronisation und Triggerung konzipierten Bussen und bedeutenden Softwaremerkmalen. Somit ist PXI eine äußerst leistungsfähige, gleichzeitig auch kostengünstige Plattform für Mess- und Automatisierungssysteme. Daher findet es nicht nur Einsatz bei Produktionsprüfung, Maschinenüberwachung und industriellen Tests, sondern auch in den unterschiedlichsten Bereichen wie Verteidigungswesen sowie Luft- und Raumfahrt.“ [Ins08]

Das System besteht aus drei Grundkomponenten: einem Gehäuse, dem System-Controller und den modularen Peripheriemodulen. Als Schnittstelle zum PC dient die NI PXI-ExpressCard8360. Diese Karte stellt eine Brücke zum PCI Bus des PC her. Sie hat einen Datendurchsatz von bis zu 100MB/s.

Die verwendeten Peripheriemodule sind:

2,7 GHz RF Vector Signal Generator *NI PXI-5671*

Der Signalgenerator besteht aus zwei Modulen, einem *NI PXI-5441* arbitrary waveform generator (AWG) und einem *NI PXI-5610* Upconverter. Die Ansteuerung dieser beiden Module erfolgt als ein gemeinsames Gerät, da in der Softwareumgebung mit den direkten Frequenzen gearbeitet wird und diese automatisch umgesetzt werden.

Der AWG generiert die gewünschte Signalform im Zwischenband (Internal Frequency - IF) von $15 - 25\text{MHz}$. Diese wird dann mit dem Upconverter auf die gewünschte Übertragungsfrequenz gemischt.

- Frequenzbereich von 250kHz bis $2,7\text{GHz}$
- Signalpegel von -145 dBm bis $+10\text{ dBm}$
- Unterstützt eine Frequenzstabilität von $\pm 20\text{ppb}^1$

2,7 GHz RF Vector Signal Analyzer *NI PXI-5661*

Auch der Vector Signal Analyzer besteht aus zwei Modulen, einem Downconverter *NI PXI-5600* und einem Digitizer *NI PXI-5142*. Diese beiden Module sind als Verbund zu sehen und werden als ein Gerät von der Software angesteuert. Der Downconverter mischt das empfangene HF-Signal in ein Zwischenfrequenzband und gibt dieses Signal an den Digitizer weiter, welcher die Daten für den Computer digitalisiert.

- Frequenzbereich von 9kHz bis $2,7\text{GHz}$
- 20 MHz real-time Bandbreite mit Quadratur digitaler Downconversion
- Unterstützt eine Frequenzstabilität von $\pm 20\text{ppb}$.

Als Softwareschnittstelle kommt NI LabVIEW 8.5 (Laboratory Virtuel Instrument Engineering Workbench) zum Einsatz. Programmabläufe werden nicht, wie allgemein üblich, als Text programmiert, sondern auf einer grafischen Oberfläche logisch verknüpft. LabVIEW bietet sehr umfangreiche Möglichkeiten, Programmabläufe zu erstellen. Bei LabVIEW werden so genannte VI's (Virtuelle Instrumente) erstellt. Diese VI's können aus mehreren Unterprogrammen, so genannten Sub-VI's bestehen, welche auch eigenständig

¹parts per billion ($1\text{ppb} = 10^{-9} = 0,000000001$)

lauffähig sind. Dazu werden diese mit „Drähten“ logisch verknüpft und es entsteht ein definierter Datenfluss zwischen diesen Modulen.

Zu der Software gehört auch ein Modulationstoolkit, welches aus Modulen (VI's) besteht, die zur Erzeugung verschiedener Modulationen unter LabVIEW benutzt werden können.

2.3 Grundlagen der Modulation

2.3.1 Notwendigkeit einer Modulation

Ziel einer Kommunikationsverbindung ist es, Signale von einem Punkt zu einem anderen zu übertragen. Hier ist zu unterscheiden, in welcher Frequenzlage dieses Signal übertragen wird. Beispielsweise liegt Sprache in einem bestimmten Frequenzbereich, dem Basisband vor. Möchte man dieses Signal ohne Modulation übertragen, benötigt man dessen komplettes Frequenzband. Das hätte zur Folge, dass bei einem verfügbaren Kanal in diesem Frequenzbereich immer nur ein Signal zu einer Zeit übertragen werden kann. Um mehrere Information zeitgleich übertragen zu können, müssten auch mehrere Kanäle (beispielsweise Leitungen) zur Verfügung stehen.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen und der besseren Anpassung an den Übertragungskanal wird deutlich, warum es notwendig wird, zuvor ein Basisbandsignal zu bearbeiten. Dazu wird das Basisbandsignal auf einen Träger höherer Frequenzlage moduliert, hierbei handelt es sich um ein Bandpasssignal. Als Trägersignal wird im Allgemeinen ein Sinus verwendet, bei welchem je nach Modulationsverfahren die Parameter Amplitude, Frequenz und Phase beeinflusst werden können. [Mäu95] Im Vergleich zur Übertragung eines Signals im Basisband, ist die Übertragung eines Bandpasssignals durch die Modulation(Sender) und die dazugehörige Demodulation(Empfänger) deutlich aufwändiger, aber der Nutzen rechtfertigt dieses. [MG02]

Abbildung 2.3 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Übertragungsstrecke mit Hilfe einer Modulation und Demodulation.[MG02]

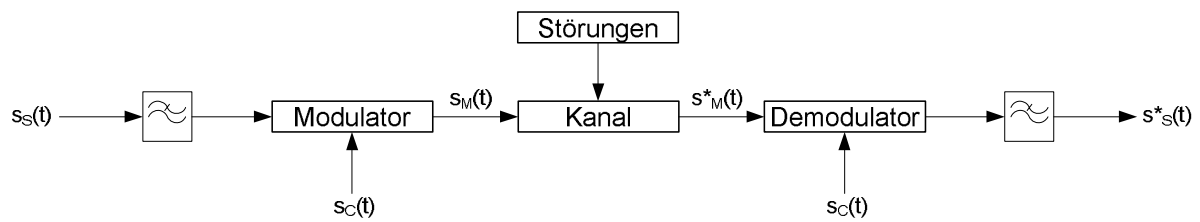


Abbildung 2.3: Aufbau einer Übertragungsstrecke

- $s_S(t)$ Basisbandsignal, modulierendes Signal
- $s_C(t)$ Träger(-Signal)
- $s_M(t)$ Modulationssignal, modulierte Signal, Modulationsprodukt
- $s_M^*(t)$ durch Störungen während der Übertragung sowie durch die Eigenschaften des Kanals beeinflusstes Modulationssignal
- $s_S^*(t)$ demoduliertes (rückgewonnenes) Signal

2.3.2 Angewandte Modulationsverfahren

Es existieren zwei grundlegende Modulationsarten, die Modulation digitaler Basisbandsignale (digitale Modulation) und die Modulation analoger Basisbandsignale z.B. Sprache (analoge Modulation). Darüber hinaus wird zwischen linearen und nichtlinearen Modulationsverfahren unterschieden. Von linearen Modulationsverfahren spricht man, wenn ein linearer Zusammenhang zwischen dem zu übertragenden Basisbandsignal $s_S(t)$ und dem Modulationssignal $s_M(t)$ besteht. Da bei linearen Modulationsverfahren das weiße gaußsche Rauschen (AWGN - additive white gaussian noise) am Ausgang des Demodulators nicht mehr weiß, aber noch gaußverteilt ist, ermöglicht es eine relativ einfache Analyse z.B. hinsichtlich der Bitfehlerwahrscheinlichkeit (BER). Der Vorteil linearer Modulationsverfahren liegt in der höheren Bandbreitenausnutzung. Problematisch sind die hohen Anforderungen an die Linearität der Übertragungsstrecke.

Bei nichtlinearen Verfahren existiert der oben beschriebene Zusammenhang nicht. [MG02] Zu den nichtlinearen Verfahren gehören unter anderem die analoge Phasenmodulation (PM) und die Frequenzmodulation (FM), zu den linearen beispielsweise die PSK (Phase Shift Keying - Phasenumtastung). [MG02]

In den nächsten Abschnitten wird auf die in dieser Arbeit angewandten Verfahren, die PSK (phase shift keying), speziell die BPSK und die analoge PM eingegangen.

2.3.3 Phasentastung (PSK)

Bei diesem Modulationsverfahren wird die Phase der Trägerschwingung entsprechend dem zu übertragenden digitalen Signal umgetastet. Die Amplitude und Frequenz der Trägerschwingung bleiben dabei unverändert. Bei der einfachsten Form einer PSK, der BPSK, wird zwischen zwei Phasenlagen ($0^\circ, 180^\circ$) umgetastet. Die BPSK ist eine sehr sichere Modulation, da der Abstand zum Nachbarsymbol sehr groß ist, dies hat aber zur Folge, dass die Datenrate klein ist, sie ist maximal $1\text{bit}/Hz$ (f_S Basisbandfrequenz). Der Träger ist ein sinusförmiges Signal, welches beschrieben ist mit:

$$s_C(t) = \sin(\Omega t + \varphi(t)) \quad (2.1)$$

wobei φ der informationstragende Parameter ist. [MG02] Als Basisbandsignal liegt ein serieller Datenstrom von „0“ und „1“ vor. Mit einer NRZ-L Codierung würde das bedeuten, dass die logische 0 beispielsweise einen Pegel von -1 Volt und die logische 1 einen Pegel von +1 Volt bekommt.

$$d(t) = \begin{cases} +1 \\ -1 \end{cases} \quad (2.2)$$

Durch die Multiplikation der Daten mit dem Träger,

$$s_M(t) = d(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (2.3)$$

entsteht folgende Funktion:

$$s_M(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_c t) & \text{für bit „1“} \\ -\sin(2\pi f_c t) & \text{für bit „0“} \end{cases} \quad (2.4)$$

Die Abbildung 2.4 zeigt die Zeitfunktion einer BPSK. Als Bitsequenz wurde hier eine einfache 1 0 1 0 Sequenz gewählt. Im Zustand „1“ wird das Trägersignal mit +1 multipliziert und das Signal bleibt unverändert. Bei einer übertragenen binären „0“ wird der Träger mit -1 multipliziert und dreht sich um 180° in seiner Phase. Die Abbildung 2.5 verdeutlicht diesen Zusammenhang im Zustandsdiagramm. Hier wird vor allem deutlich, warum die BPSK zu den sehr störunanfälligen Modulationen gehört. Der Abstand der Symbole ist sehr groß, somit beeinflussen auch größere Abweichungen der Phase, zum Beispiel Rauschen, die sichere Detektion kaum. Diese Betrachtung ist stark idealisiert.

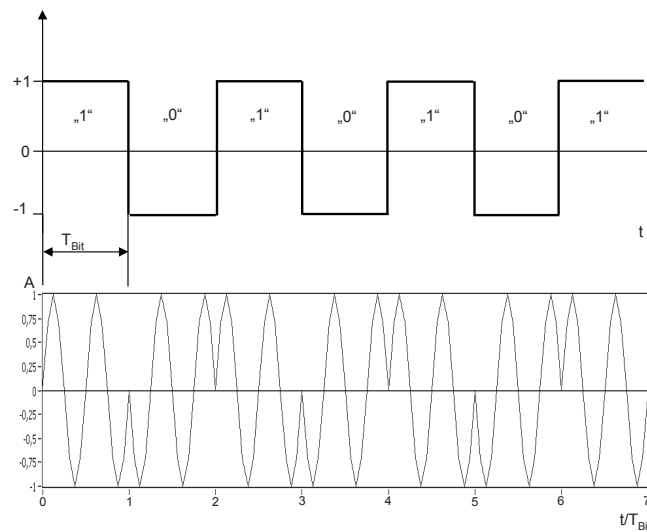


Abbildung 2.4: Zeitfunktion einer BPSK für eine Sequenz 1 0 1 0 1 0 1

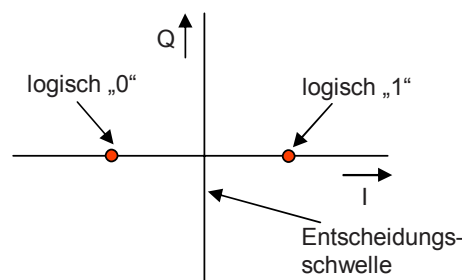


Abbildung 2.5: Zustandsdiagramm einer BPSK

Es wird beim Rechtecksignal von ideal steilen Flanken ausgegangen, welche in der Praxis nicht vorhanden sind. Daraus folgt, dass in den Phasen des Zustandswechsels die endliche Flankensteilheit zu variierenden Phasenzuständen führt.

Die Abbildung 2.6 zeigt das Spektrum einer BPSK Übertragung mit einer Bitsequenz von 130 Symbolen im 1 0 Wechsel. Die Trägerfrequenz liegt in diesem Beispiel bei 16kHz und die Symbolrate f_B bei 4kHz . Durch die Verwendung eines bipolaren Leitungscode „non-return-to-zero-level“ (NRZ-L) wird der Träger im Spektrum durch die Gleichstromfreiheit des Basisbandsignals weitgehend unterdrückt.

Modulation und Demodulation einer BPSK

Die Modulation bzw. Erzeugung einer BPSK ist relativ einfach. Es wird lediglich das Basisbandsignal mit der Trägerschwingung ($\sin(\omega t)$) multipliziert (Abbildung 2.7).

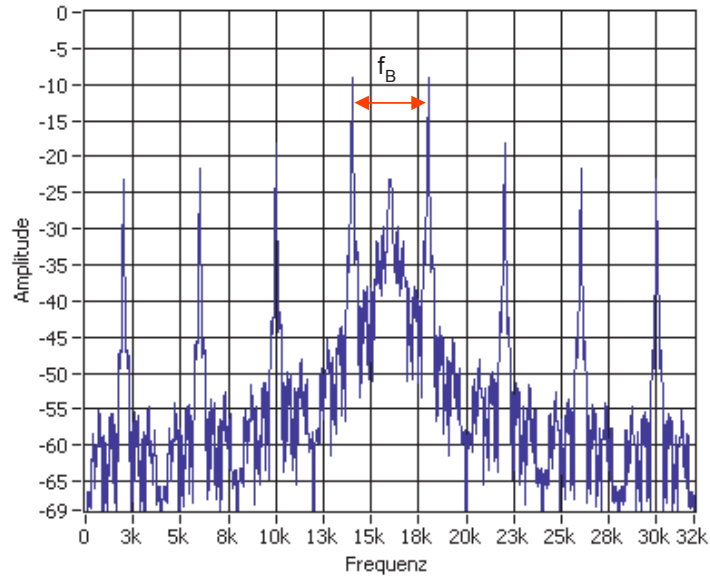


Abbildung 2.6: Spektrum einer BPSK

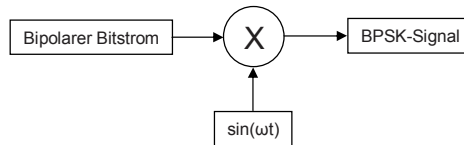


Abbildung 2.7: BPSK-Modulator

Da bei der Modulation der Träger verloren geht, ist es notwendig, ihn bei der Demodulation wiederherzustellen. Der Träger muss frequenzrichtig und unmoduliert sein und dient als Phasenbezugsgröße für die Demodulation. Ein Verfahren zur Trägerrückgewinnung ist das *Squaring Loop*-Verfahren. Hierbei wird das Eingangssignal quadriert (Abbildung 2.8). [MG02]

$$\begin{aligned} [d(t)A_e \cos(\omega_c t + \Phi)]^2 &= A_e^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2(\omega_c t + \Phi) \right] \\ &= \frac{1}{2} A_e^2 [1 + \cos(2\omega_c t + 2\Phi)] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dieses Signal wird anschließend Bandpass gefiltert und man erhält eine Spektrallinie bei der doppelten Trägerfrequenz.

$$\frac{1}{2} A_e^2 \cos(2\omega_c t + 2\Phi) \quad (2.6)$$

Die Halbierung dieser gewonnenen Frequenz ergibt wiederum die Trägerfrequenz

$$A_e^2 \cos(\omega_c t + \Phi) \quad (2.7)$$

Durch die Frequenzteilung entsteht eine Phasenunsicherheit des Hilfsträgers von $\pm\pi$. Eine weitere Möglichkeit der Demodulation ist die *Costas-Loop* (Regelschleife). Sie ent-

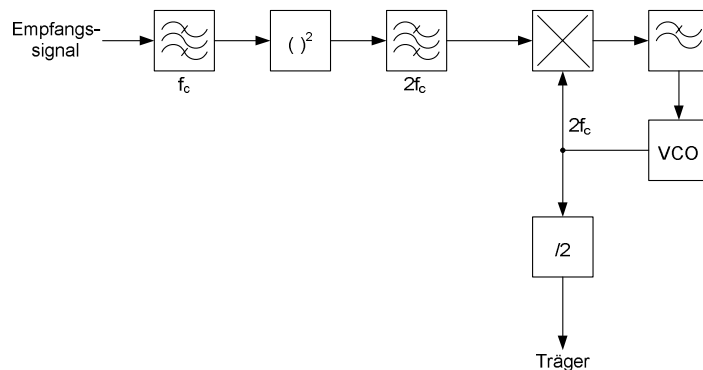


Abbildung 2.8: Squaring Loop

hält einen „In-Phase Demodulator“ und einen „Quadratur Demodulator“ (Abbildung 2.9). Der I-Demodulator liefert das demodulierte Signal. Durch den spannungsgesteu-

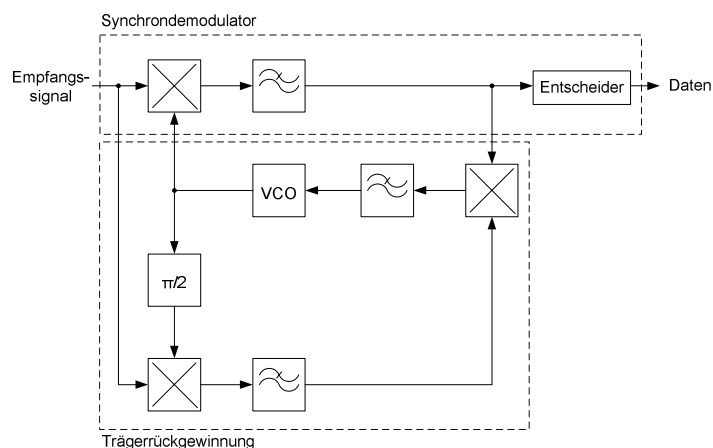


Abbildung 2.9: Costas Loop Regelschleife [MG02]

erten Oszillator (VCO voltage controlled oscillator) bildet der Q-Demodulator eine Phasen-Regelschleife (PLL phase lock loop). Bei einer Übereinstimmung von Frequenz und Phasenwinkel wird im Q-Demodulator eine Cos- mit einer Sin-Schwingung multipliziert. Durch das Fehlen eines Gleichanteils entsteht auch keine Nachstimmspannung. Sie

entsteht nur, wenn sich der Phasenwinkel Φ ändert. Das Nachrichtensignal beeinflusst aber auch die Ausgangsspannung des Q-Demodulators und wird damit zu einer Wechselgröße, die nicht als Nachstimmspannung geeignet ist. Um das zu umgehen, wird die Ausgangsspannung des I-Demodulators mit der Ausgangsspannung des Q-Demodulators multipliziert. Der nachgeschaltete Loop-Filter entfernt den verbleibenden Wechselanteil. Es entsteht eine vorzeichenrichtige Nachstimmspannung.

2.3.4 Phasenmodulation (PM)

Die Phasenmodulation gehört zu den Winkelmodulationen, bei welcher sich der Momentanphasenwinkel der Trägerschwingung in Abhängigkeit des modulierenden Signals ändert. Dabei kommt es auch zu einer Änderung der Momentanfrequenz der Trägerschwingung. Die Phasenmodulation kann nur schwer allein beschrieben werden, da sie stark mit der Frequenzmodulation verwandt ist. Eine direkte Unterscheidung beider Modulationsarten ist erst mit einer Änderung der Frequenz des modulierenden Signals möglich. Die Trägerschwingung wird nur durch den Phasenwinkel beeinflusst, die Amplitude bleibt dabei immer konstant.

Bei der Trägerschwingung handelt es sich um eine sinusförmige Funktion

$$s_C(t) = A \cdot \cos(\omega_C t) \quad (2.8)$$

Der Phasenwinkel wird durch die Kosinusfunktion bestimmt

$$\varphi_C(t) = \omega_C t = 2\pi \cdot f_C t \quad (2.9)$$

Der Phasenwinkel $\varphi_C(t)$ der Trägerschwingung wächst bei konstanter Frequenz f_C proportional mit der Zeit. Durch einen Winkelmodulator wird der Trägerphasenwinkel durch das modulierende Signal beeinflusst. Daraus folgt, dass in das Modulationsprodukt $s_M(t)$, der Phasenwinkel $\varphi_C(t)$ in den vom Modulationssignal abhängigen Phasenwinkel $\varphi_M(t)$ übergeht. Der Phasenwinkel setzt sich zusammen aus dem zeitproportionalen Anteil $\varphi_C(t)$ und dem signalabhängigen Wechselanteil φ_{CW}

$$\varphi_M(t) = \varphi_C(t) + \varphi_{CW}(t) = \omega_C t + \Delta\varphi_C \cdot \cos(\omega_s t) \quad (2.10)$$

Die maximale Änderung des Phasenwinkels vom Modulationsprodukt $\varphi_M(t)$ zum Phasenwinkel des Trägers $\varphi_C(t)$ wird durch den Phasenhub $\Delta\varphi_C$ bestimmt (Abbildung 2.10).

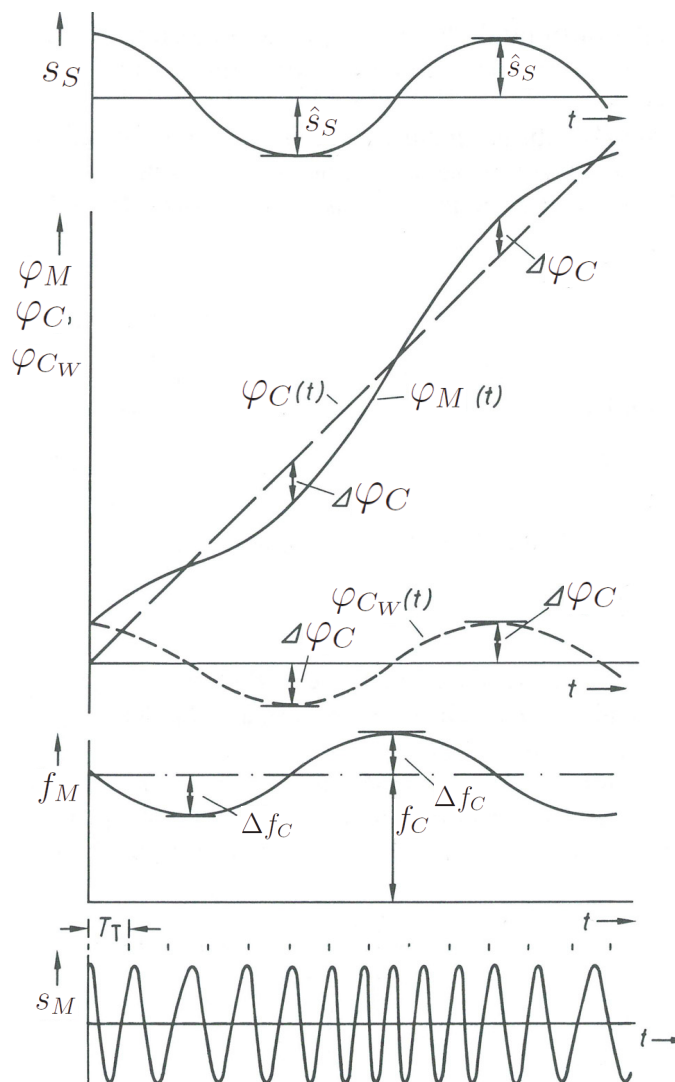


Abbildung 2.10: Phasenwinkel und Frequenz bei der winkelmodulierten Schwingung abhängig vom modulierenden Signal [Mäu92]

Die Momentanfrequenz $f_M(t)$ der winkelmodulierten Schwingung mit der Winkelgeschwindigkeit ω

$$\omega = \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (2.11)$$

wird berechnet aus

$$f_M(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi_M(t)}{dt} \quad (2.12)$$

und ergibt

$$\begin{aligned} f_M(t) &= \frac{1}{2\pi} \cdot (\omega_C + \Delta\varphi_C \cdot (-\sin(\omega_S t)) \cdot \omega_S) \\ &= f_C - \Delta\varphi_C \cdot f_S \cdot \sin(\omega_S t) \\ &= f_C - \Delta f_C \cdot \sin(\omega_S t) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Die Verknüpfung von Frequenzhub und Phasenhub einer sinusförmigen winkelmulierten Schwingung ist die wichtigste Beziehung. Für das sinusförmige Modulationssignal ergibt sich nach Gl. 2.13 der Zusammenhang

$$\Delta f_C = \Delta\varphi_C \cdot f_S \quad (2.14)$$

wobei Δf_C die maximale Änderung der Trägerfrequenz darstellt, diese wird als Frequenzhub bezeichnet.

Sehr anschaulich lassen sich diese Zusammenhänge mit Hilfe des Pendelzeigerdiagramms erläutern (Abbildung 2.11). Der mit der Winkelgeschwindigkeit ω_C rotierende Zeiger erhält, durch die Modulation verursacht, eine zusätzliche Auslenkung in beide Richtungen mit dem Maximalwert $\Delta\varphi_C$. An den Umkehrpunkten 1 und 5 bzw. 3 und 7 erfolgt kurzzeitig keine Frequenzänderung, dass heißt, der Trägerzeiger steht in Bezug auf die Winkelgeschwindigkeit ω_C für einen kurzen Moment still. Die größte Frequenzänderung erfolgt beim Durchlaufen der Punkte 2, 4 und 6, da sich dort der Phasenwinkel am schnellsten ändert. [Mäu92]

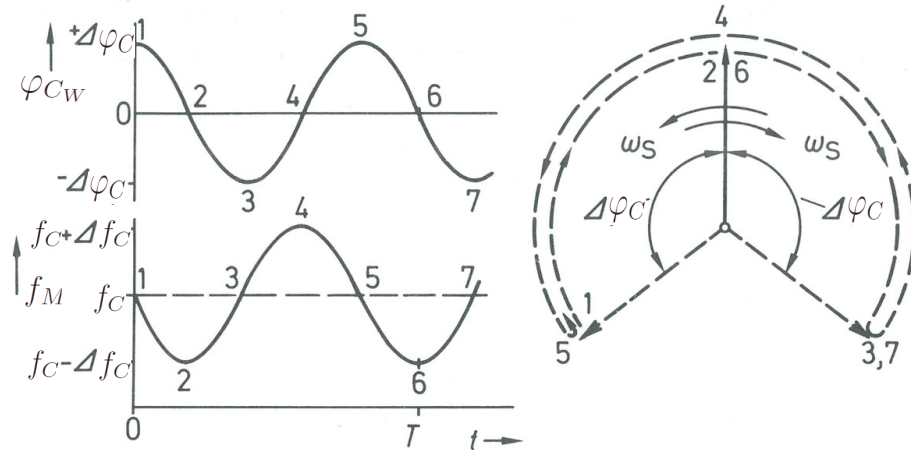


Abbildung 2.11: Wechselanteil des Momentanphasenwinkels und der Momentanfrequenz im Zusammenhang mit dem Pendelzeigerdiagramm [Mäu92]

Im Unterschied zu der Frequenzmodulation ändert sich bei der Phasenmodulation der Momentanphasenwinkel des Trägers $\varphi_C(t)$ proportional zu dem Momentanwert des modulierenden Basisbandsignal $s_S(t)$. Dadurch gilt auch:

$$\Delta\varphi_C \sim s_S \quad (2.15)$$

Hierbei nimmt die Signalfrequenz f_S keinen Einfluss auf den Phasenhub $\Delta\varphi_C$, dieser ist völlig unabhängig. Die Frequenzänderung f_{Cw} (Wechselanteil der Momentanfrequenz der winkelmodulierten Schwingung), welche in Zusammenhang mit der Phasenänderung steht, erhält man durch

$$f_{Cw}(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi_{Cw}(t)}{dt} \quad (2.16)$$

und in Abhängigkeit vom modulierenden Signal $s_S(t)$

$$f_{Cw}(t) \sim \frac{ds_S(t)}{dt}. \quad (2.17)$$

Bei der Phasenmodulation ist der Frequenzhub Δf_C proportional zur Signalfrequenz f_S .

$$\Delta f_C \sim f_S \quad (2.18)$$

Dieses entsteht durch das Differenzieren nach der Zeit. Abbildung 2.12 zeigt die Zeitfunktion einer Phasenmodulation. [Vor93] Das Maß für die Intensität der Modulation

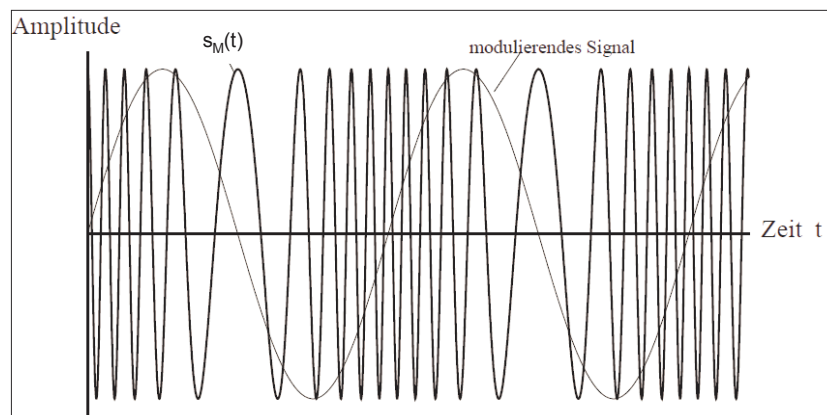


Abbildung 2.12: Zeitfunktion einer Phasenmodulation

ist der Phasenhub. Die Größe des Phasenhubes entscheidet maßgeblich über die Anzahl der Seitenbänder. Die Seitenbänder haben einen Abstand von f_S (Frequenz des Basisbandsignals) und dessen Vielfachem ($2f_S, 3f_S, \dots$) und sind symmetrisch zum Träger. Abbildung 2.13 zeigt Spektren mit verschiedenen Phasenhüben.

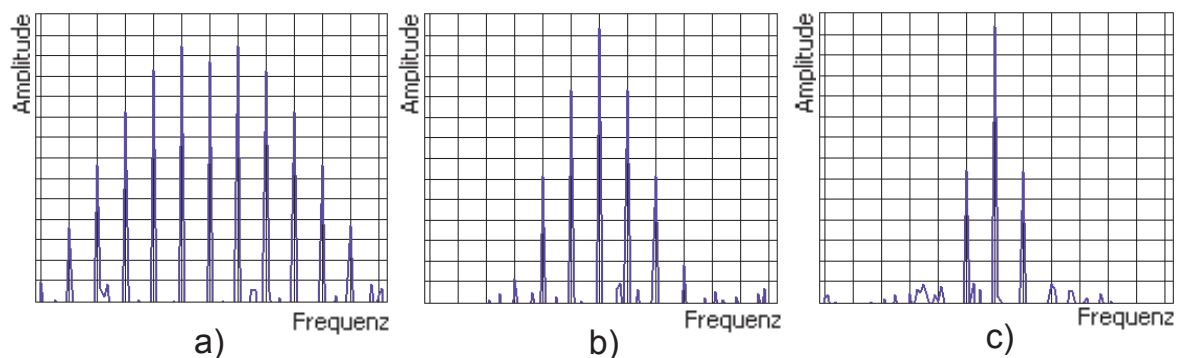


Abbildung 2.13: Verschiedene Spektren einer Phasenmodulation mit verschiedenen Phasenhüben

- a) Phasenhub von: $\eta = 1,75\text{rad} = 100^\circ$
- b) Phasenhub von: $\eta = 0,35\text{rad} = 20^\circ$
- c) Phasenhub von: $\eta = 0,03\text{rad} = 2^\circ$

Wie deutlich zu erkennen ist, steigt mit steigendem Phasenhub auch die Anzahl der Seitenbänder. Bei Phasenhüben über $\eta = 1,42\text{rad} = 81^\circ$ werden die Seitenbänder größer als der Träger.

3 Simulation

Die Simulation dient unter anderem dazu, eine genauere Vorstellung über die verwendeten Module zu erhalten. Darüber hinaus erfasst sie die Parameter für die Modulation und bietet die Möglichkeit, diese zu testen. Teile der Simulation können später auch in das Programm für die Hardware implementiert werden. Die Programmierung erfolgt in der Umgebung von LabVIEW. Im Unterschied zum eigentlichen Testsystem ist der Modulator und dessen Empfänger (Demodulator) zum Testen in einem Virtuellen Instrument (VI) vereint. Es sind in der Hardwareumgebung später zwei getrennte Systeme, wobei der Empfangspart der Sendeseite nur zur Überprüfung des Testsystems erstellt wird, da das später der Empfänger des Satelliten ist.

Bei der Simulation werden nur einfache Modelle betrachtet, um mögliche Fehlerquellen leichter lokalisieren zu können. Ziel ist es, die Parameter für die einzelnen Sub-VIs zu ermitteln und zu überprüfen. Als Dateninterface wird ein einfacher Bitgenerator verwendet. In der Hardwareumgebung wird dieser durch ein optionales Interface ersetzt, mit welchem es möglich ist, Daten via Datei an den Sender zu übergeben.

Um die Simulation möglichst einfach zu gestalten, wird auf den konstanten Träger, welcher zum Einloggen des Satelliten verwendet wird, verzichtet und die Daten werden als Burst bzw. in einer Schleife moduliert und demoduliert. Die Simulation erfolgt in einem anderen Frequenzbereich, da für die Abtastung höherer Frequenzen zu viele Abtastwerte generiert werden und dafür die Kapazität des Computers bzw. des Arbeitsspeichers nicht ausreicht. Für eine prinzipielle Betrachtung ergibt sich daraus kein Nachteil.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, vorab das Spektrum zu betrachten, um bei der Umsetzung in die Hardware einfacher deren Richtigkeit überprüfen zu können.

3.1 Verwendete Module in der Simulation

Im Folgenden werden die einzelnen Module, die in der Simulation verwendet werden, beschrieben und deren Funktion vorgestellt.

Generierung der Systemparameter

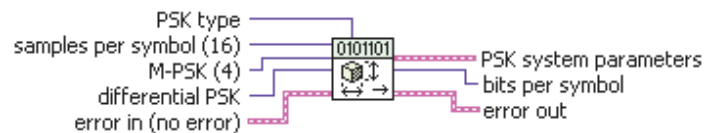


Abbildung 3.1: Modul für die Generierung der Systemparameter

Zur Definition der Parameter für die Modulation bzw. Demodulation der PSK wird das Modul „MT Generate System Parameters.vi“ verwendet. Dieses Modul ermöglicht Einstellungen zum Grad der Modulation (BPSK oder höher). Die Einstellung „PSK-Typ“ ermöglicht die Wahl einer normalen, offset- oder shifted-PSK. Der Einsatz einer Offset PSK erfolgt meist bei einer QPSK (Quadratur PSK). Der Parameter „Samples per Symbol“ dient zur Einstellung der Abtastpunkte pro Symbol. Standardmäßig ist dieser Wert auf 16 Samples per Symbol eingestellt. Die Ein- und Ausgänge „Error“ werden für die Fehlererkennung und Weiterleitung benutzt. Dieses Modul liefert an seinem Ausgang die Systemparameter, welche an den PSK-Modulator/Demodulator und an das Modul für die Synchronisationsparameter übergeben werden.

Generierung von Testdaten

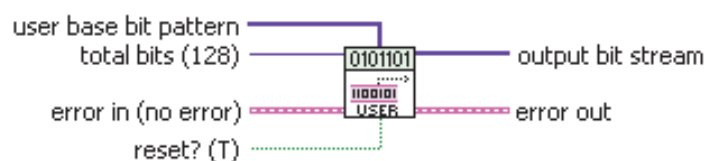


Abbildung 3.2: Modul für die Generierung von Testdaten

Das Modul zur Generierung von Bitströmen wird dazu verwendet, zufällig generierte oder zuvor definierte Daten zu erzeugen. Für die Simulation ist es sinnvoll, fest definierte Daten zu nutzen, um bei der Überprüfung der Daten zu wissen, was gesendet wurde. Als Datenstrom wird eine $x55_{hex}$ 16-mal wiederholt. Dazu wird unter „user base bit pattern“ ein 8-stelliges Array erstellt. Die Anzahl der bits, hier $16 \cdot 8$ werden unter „total bits“ definiert. Das Modul gibt am Ausgang den gewünschten seriellen Datenstrom aus

und wird an den PSK Modulator übergeben. Vor diesen Datenstrom wird eine Synchronisationssequenz eingefügt, damit für den Demodulator ein Referenzsignal zur Verfügung steht.

Generierung der Synchronisationsparameter

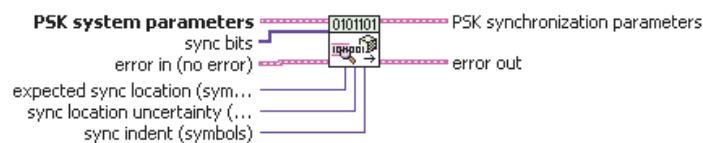


Abbildung 3.3: Modul für die Synchronisationsparameter

Dieses Modul dient dazu, die Synchronisationsparameter für den Demodulator der BPSK zu generieren. Sie sind notwendig, damit der Demodulator die Phasenzustände für die Symbole richtig interpretieren kann, da diese bei einer BPSK undefiniert sind. Dazu untersucht der PSK-Demodulator den einlaufenden Datenstrom nach dem bekannten Synchronisationsmuster und legt entsprechend die Bitzustände je nach Phasenlage fest. Die zuvor generierten Systemparameter müssen an dieses Modul übergeben werden, wie auch die Angabe der Synchronisationssequenz. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Angaben zur Position der Sequenz zu machen, sofern diese bekannt ist.

PSK Modulation

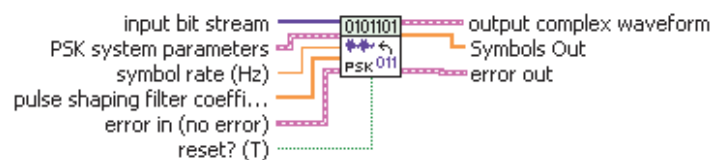


Abbildung 3.4: Modul für die Generierung der BPSK

Mit diesem Modul wird die BPSK Modulation durchgeführt. Die Modulation wird im Basisband durchgeführt und als komplexes Basisband-Signal ausgegeben. Definiert wird hier auch die Symbolrate, die aussagt, mit welcher Geschwindigkeit die zu sendenden Daten bzw. Bits auf den Träger moduliert werden, das heißt, der Abstand des Phasenwechsels im Passbandsignal. Da das generierte BPSK modulierte Signal im Basisband vorliegt, muss es mittels eines Aufwärtsmischers (Upconverter) auf die gewünschte Trägerfrequenz gemischt werden. In diesem Fall handelt es sich um einen Unterträger von $16kHz$.

PSK Demodulation

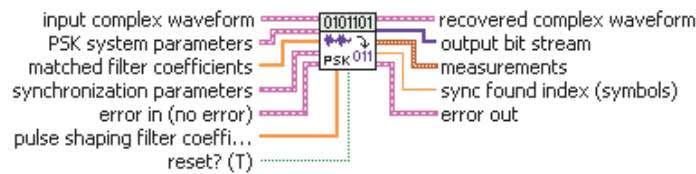


Abbildung 3.5: Modul für die Demodulation der BPSK

Die BPSK Demodulation des Unterträgers wird mit Hilfe dieses Modules realisiert. Dazu werden die zuvor generierten Parameter an den Demodulator übergeben. Von diesem Modul wird ein serieller Bitstrom ausgegeben, welcher anschließend zur Anzeige an das Frontpanel übergeben wird.

PM Modulation

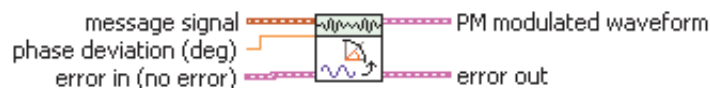


Abbildung 3.6: Modul für die Generierung der PM

Bei dem Modul für die Phasenmodulation wird ein Basisbandsignal phasenmoduliert. Als Parameter dient hier der Phasenhub, welcher in Grad angegeben wird. Der bei dieser Arbeit verwendete Phasenhub beträgt $71,62^\circ$. Es wird eine komplexe Signalform ausgegeben, welche an einen Aufwärtsmischer (Upconverter) übergeben wird. Dieser mischt das Signal dann auf die Übertragungsfrequenz des Trägers.

PM Demodulation

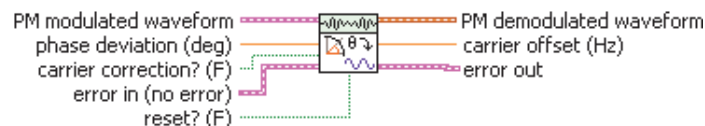


Abbildung 3.7: Modul für die Demodulation der PM

Der Phasendemodulator demoduliert ein phasenmoduliertes Passbandsignal zurück ins Basisband. Dazu muss der Phasenhub angegeben werden.

Upconverter Der Upconverter hat die Funktion, ein Basisbandsignal in einen höhe-

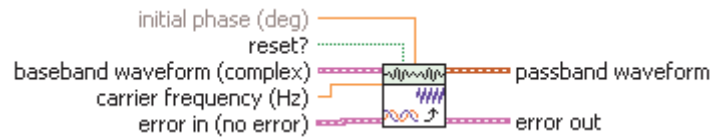


Abbildung 3.8: Modul für den Aufwärtsmischer (Upconverter)

ren Frequenzbereich zu mischen. Es ist lediglich eine Einstellung der Trägerfrequenz notwendig. Die Einstellungsmöglichkeit einer Initialisierungsphase kann dazu verwendet werden, eine andere „Start“-Phase als 0 Grad zu verwenden.

Downconverter

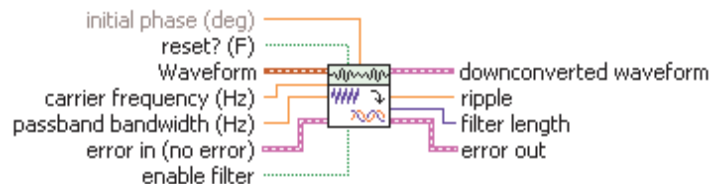


Abbildung 3.9: Modul für den Abwärtsmischer

Im Prinzip ist der Abwärtsmischer (Downconverter) das genaue Gegenstück vom Aufwärtsmischer, nur besteht hier die Möglichkeit, die eingehende Bandbreite zu begrenzen, um eventuelle Störungen bzw. unerwünschte Signale aus dem empfangenen Signal herauszufiltern. Das Modul gibt am Ausgang das Basisbandsignal aus. Als weiterer Ausgang steht „ripple“ zur Verfügung, welcher Aussagen zur Pegelabweichung im Vergleich zu 0dB gibt und Angaben zur Filterlänge des Eingangsfilters macht.

Modul für die Abtastung

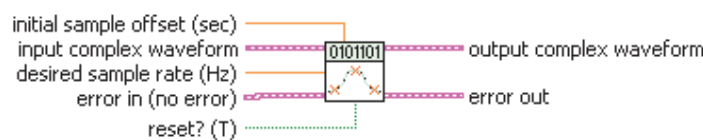


Abbildung 3.10: Modul für die Abtastung

Das Modul für die PSK-Modulation generiert eine komplexe Signalform mit $16 \cdot f_B$ Abtastwerten. Um diese Signalform auf eine höhere Frequenz zu mischen, werden mehr

Abtastwerte benötigt. Das Theorem von Nyquist-Shannon sagt aus, dass die Abtastrate größer als die doppelte maximale Signalfrequenz sein muss. Zum Beispiel bei einer Symbolrate von 2 MHz liefert der PSK-Modulator 32 Millionen Abtastwerte. Zur Mischung auf einen 100 MHz Träger werden min. 201 Millionen Abtastwerte benötigt, dazu wird das vom Modulator gelieferte Signal neu abgetastet. Die Abtastrate wird je nach Trägerfrequenz gewählt.

3.2 Sender

Wie schon beschrieben, unterscheidet sich die Simulation von der späteren Umsetzung in der Hardware. Der hauptsächliche Unterschied besteht darin, dass die eigentlich getrennt zu betrachtenden Komponenten hier in einem VI zusammengefasst werden. So wird in der Simulation der Modulator (Sendeseite) und der Demodulator (Empfangsseite) vereint. Das hat Vorteile im zeitlichen Ablauf des Programmes, da es nicht zu Problemen kommen kann, die durch unterschiedlich anlaufende Schleifen verursacht werden. Somit werden mögliche Fehlerquellen minimiert.

3.2.1 Blockschaltbild

Abbildung 3.11 zeigt das Blockschaltbild der Modulationsseite des Senders. Auf dieser Seite werden unter anderem die Daten (Basisbandsignale) generiert sowie grundlegende Einstellungen vorgenommen, wie zum Beispiel die Modulationsart und die Generierung der Synchronisationsparameter.

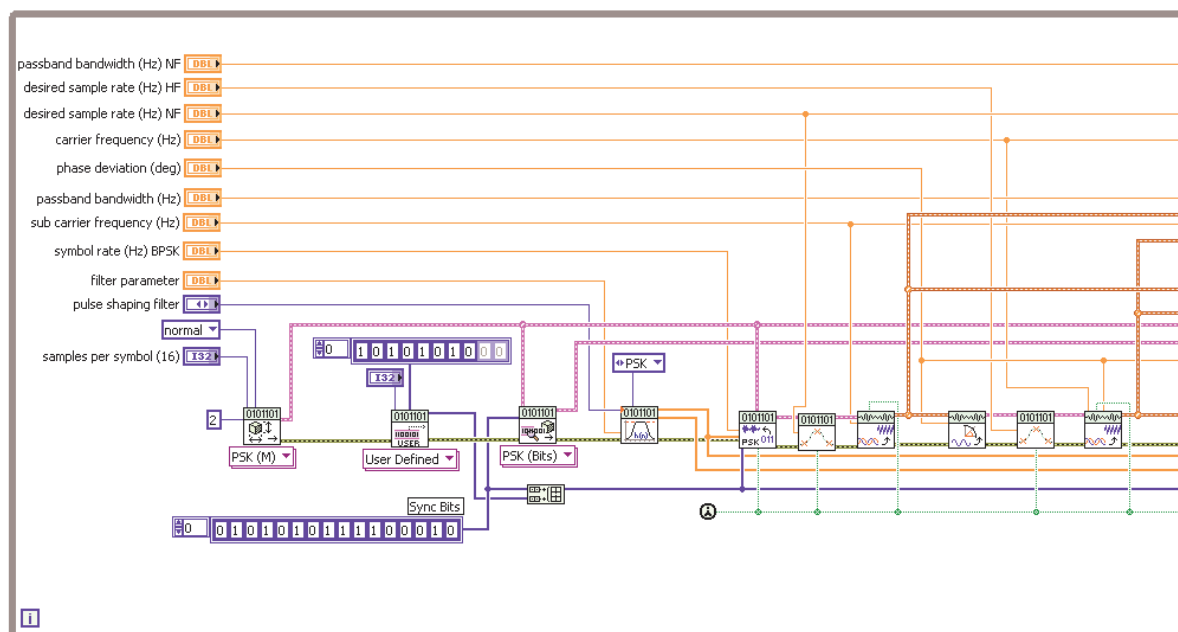


Abbildung 3.11: Blockschaltbild vom Modulator des Senders für die Simulation

Dazu ist es notwendig, die im Kapitel 3.1 beschriebenen Module miteinander zu verknüpfen, um einen Signalfluss zwischen den Modulen zu ermöglichen. Die Module werden nach dem Schema (Abbildung 3.12) verknüpft.

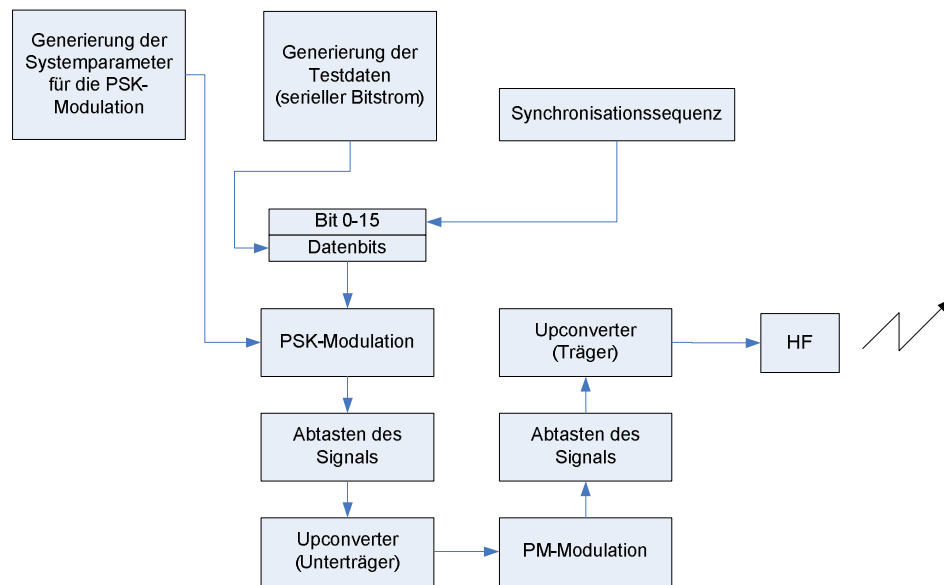


Abbildung 3.12: Ablaufplan vom Modulator des Senders für die Simulation

In Abbildung 3.13 ist die Demodulationsseite des Senders zu sehen. Hier werden die Passbandsignale wieder auf die Basisbandfrequenz gemischt und demoduliert. Zur Überprüfung der Daten werden die Eingangs- und Ausgangssignale binär dargestellt. Es wird das Spektrum von der BPSK und von der PM im Passband ermittelt und dargestellt.

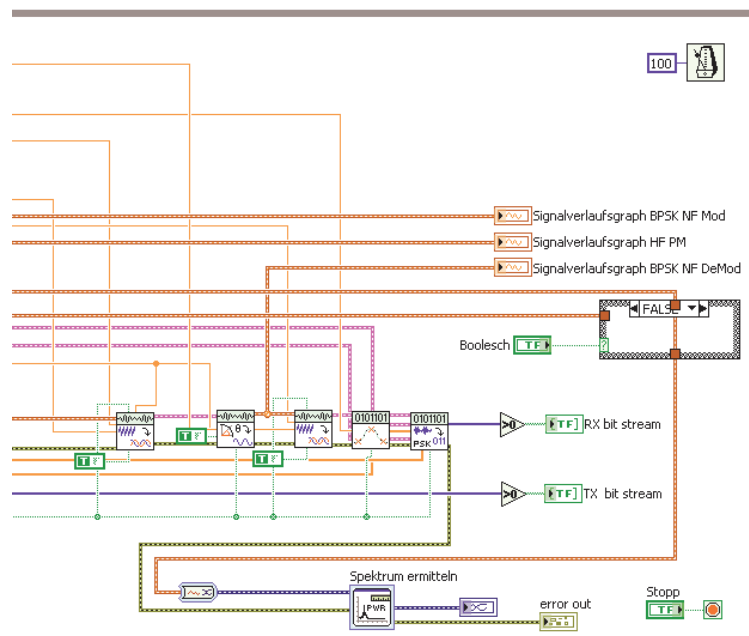


Abbildung 3.13: Blockschaltbild vom Demodulator des Senders für die Simulation

Der Ablaufplan für die Verknüpfung der Module für die Empfangsseite ist in Abbildung 3.14 dargestellt.

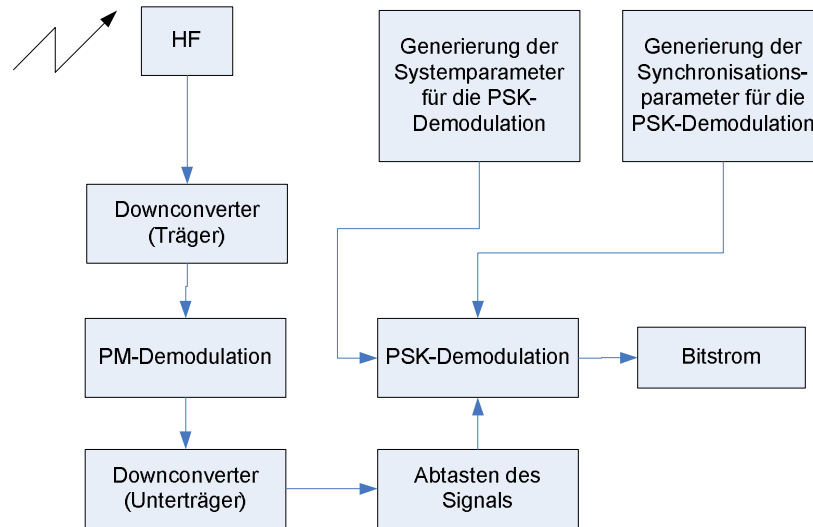


Abbildung 3.14: Ablaufplan vom Demodulator des Senders für die Simulation

3.2.2 Frontpanel

Für die Eingabe von Parametern ist ein Userinterface notwendig, welches unter LabVIEW Frontpanel genannt wird. Auf diesem Frontpanel können diverse Eingabemasken definiert und platziert werden. Es können auch Elemente zur Anzeige von Spektren oder Signalverläufen erstellt werden. Abbildung 3.15 zeigt die Eingabemaske für diverse Parameter.

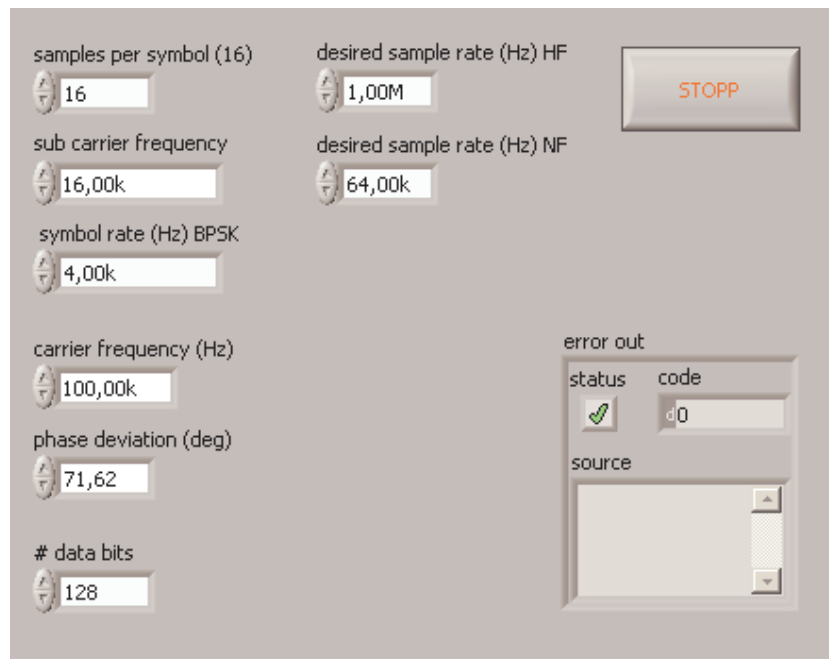


Abbildung 3.15: Frontpanel des Senders (Eingabemaske)

In der folgenden Abbildung sind die Anzeigeleisten zu sehen, welche zur optischen Überprüfung der gesendeten bzw. empfangenden Daten dienen. Sie ermöglichen einen Überblick und die Erkennung des Taktversatzes, welcher durch den Zeitverlust der Übertragung entsteht.



Abbildung 3.16: Binäre Anzeige der Sende- und Empfangsdaten (Simulation des Senders)

Am Anfang des Bitstromes ist die Synchronisationssequenz und die folgenden Datenbits (aus Platzgründen in begrenzter Länge) zu erkennen. Bei dem empfangenen Bitstrom ist, im Vergleich zum gesendeten Bitstrom, das Array um 8 Plätze nach rechts verschoben. Dies entsteht durch die Zeitverluste bei der Modulation, Übertragung und Demodulation.

Für eine bessere Analysemöglichkeit bei der späteren Umsetzung in der Hardwareumgebung ist es sinnvoll, sich das Spektrum vorab zu betrachten. Das Spektrum der Übertragungstrecke ist in Abbildung 3.17 zu sehen. Dabei liegt der Träger bei 100kHz und es ist deutlich zu erkennen, dass der Unterträger der BPSK (16kHz) rechts und links neben dem Träger liegt. Die spektralen Anteile neben dem Unterträger sind die Informationen der BPSK-modulierten Daten. Sie haben einen von der Symbolrate abhängigen Abstand, in diesem Fall 4kHz .

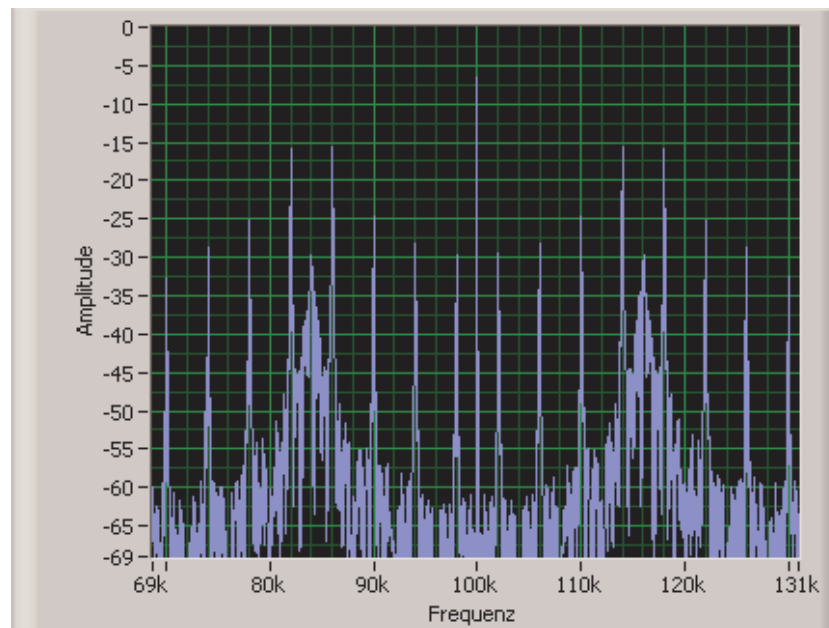


Abbildung 3.17: Spektrum BPSK PM der Simulation

3.3 Empfänger

Der Empfänger soll dazu dienen, Telemetrie vom Satelliten zu empfangen. In der Simulation wird der physikalische Sender des Satelliten simuliert und, wie auch schon beim Sender, in einem VI mit dem Empfänger eingebettet.

3.3.1 Blockschaltbild

In Abbildung 3.18 ist die Modulationsseite dargestellt. Wie auch beim Sender befinden sich hier die Module zur Generierung der Systemparameter für die Modulation sowie zur Generierung der Testdaten. Die Testdaten werden mit einer Synchronisationssequenz verknüpft und an den Modulator übergeben. Das modulierte Signal wird an einen Up-converter übergeben, welcher das Signal auf eine höhere Trägerfrequenz mischt.

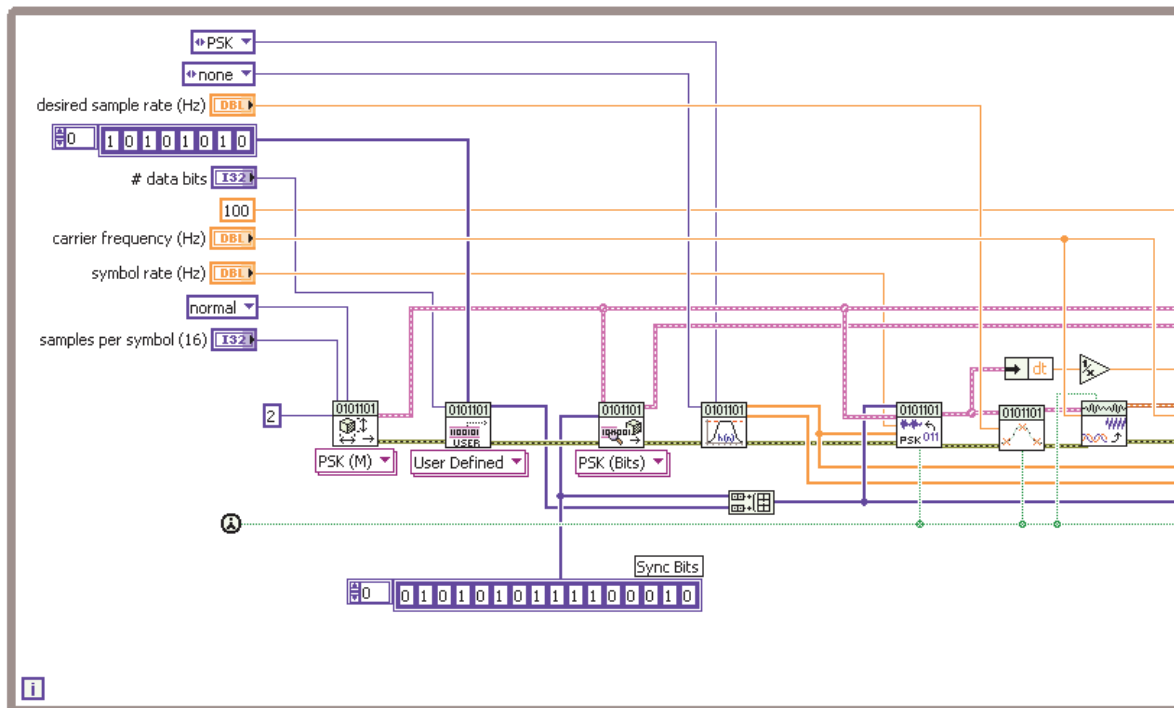


Abbildung 3.18: Blockschaltbild vom Modulator des Empfängers für die Simulation

Der Signalfluss für die Modulation ist in Abbildung 3.19 dargestellt.

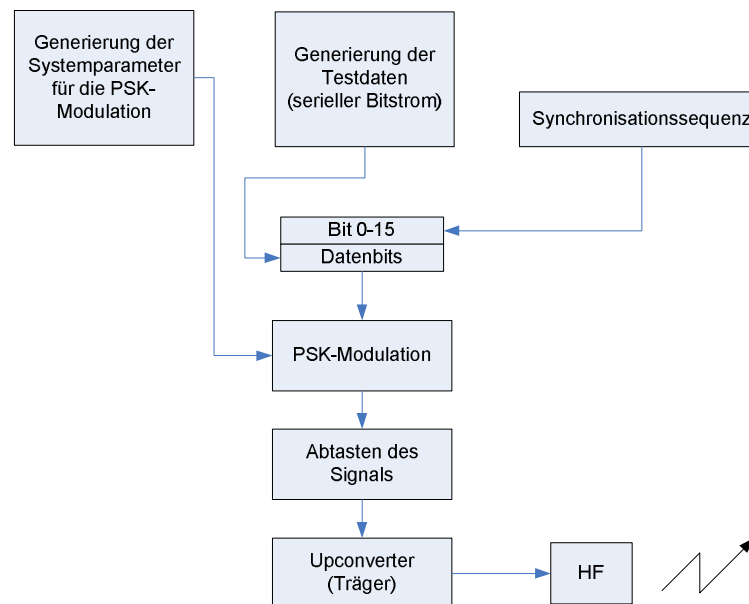


Abbildung 3.19: Ablaufplan vom Modulator des Empfängers für die Simulation

Auf der Demodulationsseite (Abbildung 3.20) des Empfängers wird das Trägersignal in das Basisband zurück gemischt und demoduliert. Die demodulierten Daten werden an das Frontpanel übergeben und binär dargestellt. Aus dem Passbandsignal wird das Spektrum ermittelt und an das Frontpanel übergeben.

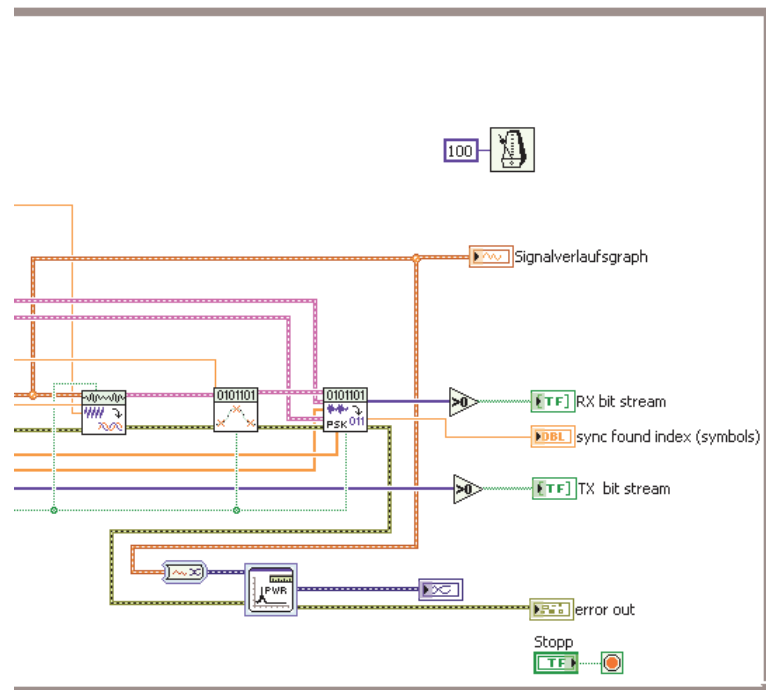


Abbildung 3.20: Blockschaltbild vom Demodulator des Empfängers für die Simulation

Die Abbildung 3.21 zeigt das Ablaufdiagramm für die Demodulationsseite.

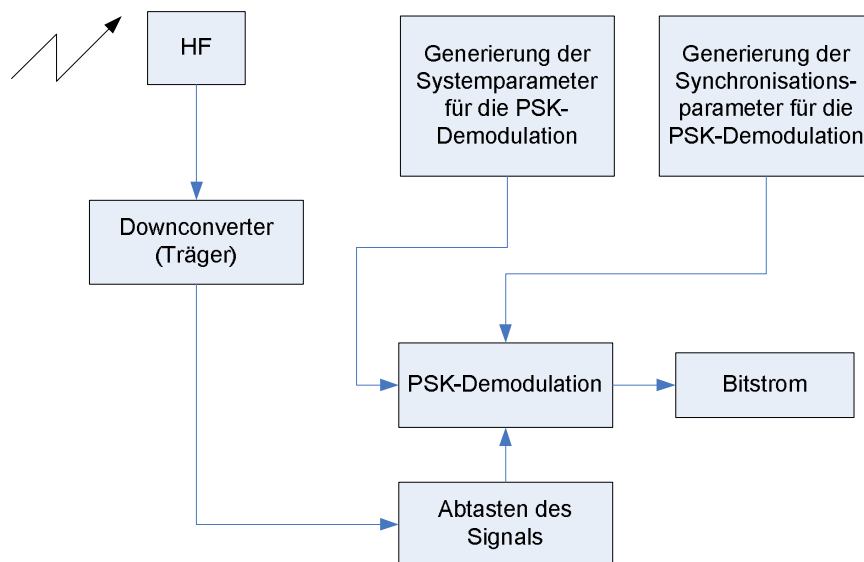


Abbildung 3.21: Ablaufplan vom Demodulator des Empfängers für die Simulation

3.3.2 Frontpanel

Auf dem Grafischen Benutzerinterface (GUI) (Abbildung 3.22) können die Parameter zur Trägerfrequenz, zur Symbolrate sowie die Abtastrate eingestellt werden. In der Simulation wird als Trägerfrequenz 100kHz und als Symbolrate 50kHz gewählt. Diese Frequenzen weichen von den eigentlichen, für das Testsystem zu verwendenden Frequenzen ab, da die Speicherkapazitäten des Computers begrenzt sind.

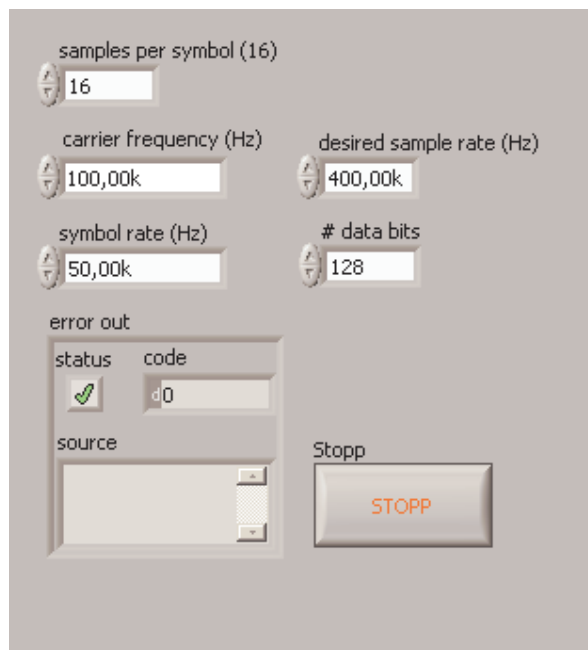


Abbildung 3.22: Frontpanel des Empfängers (Eingabemaske)

Die Abtastrate stellt den Wert für die Abtastfrequenz des BPSK-modulierten Signals ein. Dies ist notwendig, damit für den Upconverter ausreichend viele Werte zur Verfügung stehen. Die minimale Abtastrate ist nach Nyquist größer als $2 \cdot f_{max}$, f_{max} ist in diesem Fall die Trägerfrequenz von 100kHz .

Als Daten für die Simulation wird eine „10“ Folge mit einer Länge von 128 Bit verwendet. Das übertragene Spektrum ist in Abbildung 3.23 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Träger nicht mehr vorhanden ist. Dies liegt an der Gleichstromfreiheit der gesendeten Daten.

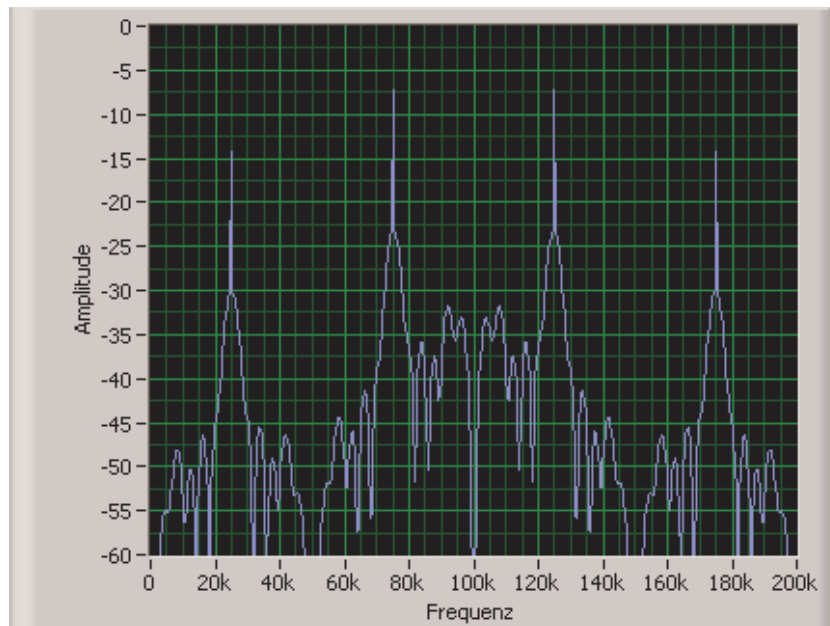


Abbildung 3.23: Spektrum BPSK (Simulation des empfängers)

Die in Abbildung 3.24 angezeigten Datenströme dienen zur Überprüfung der Übertragung. Die obere Anzeige zeigt den gesendeten Datenstrom und die untere den demodulierten Datenstrom nach der Übertragung.



Abbildung 3.24: Binäre Anzeige der Sende- und Empfangsdaten (Simulation des Empfängers)

4 Realisierung des Testsystems

In diesem Kapitel werden die Programme von Sender und Empfänger beschrieben. Die Bedienung und die Funktionen der Programme werden beschrieben sowie der Programmablauf erläutert.

4.1 Sender (Uplink)

Der Sender dient zur Kommandierung des Satelliten. Es sind drei grundlegende Kommandostrukturen vorgesehen, „immediate“, „time tag“ und „data upload“. Diese Kommandos werden im Abschnitt 4.1.1 beschrieben. Der Aufbau für das HF-Testsystem ist in Abbildung 4.1 zu sehen, wobei der Satellitenempfänger zum Zeitpunkt der Arbeit nicht zur Verfügung stand. Um während der Arbeit eine Gegenstelle zu besitzen, wird der Satellitenempfänger simuliert.

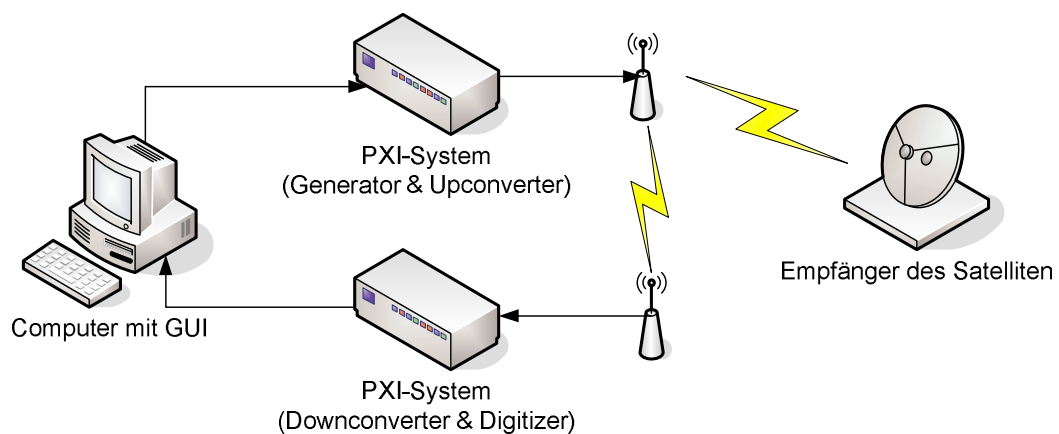


Abbildung 4.1: Aufbau des Testsystems (Sender)

4.1.1 Zusammenfassung der Anforderungen

Die Anforderungen für das HF-Testsystem sind folgende:

- Vor dem eigentlichen Senden von Informationen soll ein konstanter unmodulierter Träger zum Empfänger gesendet werden, um den Satellitenempfänger einzuloggen.
- Es muss die Möglichkeit bestehen, Telekommandos via Datei an das Programm zu übergeben.
- Es soll eine Möglichkeit geben, eine $x55_{hex}$ (IDLE) Sequenz dauerhaft zu senden.
- Die Änderung der Träger-/Unterträger-Frequenz sowie die Änderung der Symbolrate der BPSK und der Phasenhub der PM soll möglich sein.
- Die zu sendenden Daten sollen auf der grafischen Oberfläche zur Anzeige gebracht werden.

Die drei Datenformate sind wie folgt definiert:

Für immediate:

min. 8 Byte IDLE x55	2 Byte Sync. xEB x90	80 Byte Immediate
----------------------	----------------------	-------------------

Abbildung 4.2: Telekommando Format für Immediate

Für time tag:

min. 8 Byte IDLE x55	2 Byte Sync. xEB x90	102 Byte Time Tag
----------------------	----------------------	-------------------

Abbildung 4.3: Telekommando Format für Time Tag

Für data upload:

min. 8 Byte IDLE x55	2 Byte Sync. xEB x90	252 Byte Data Upload
----------------------	----------------------	----------------------

Abbildung 4.4: Telekommando Format für Data Upload

4.1.2 Technisch bedingte Einschränkungen der Anforderungen

Während der Arbeit am Projekt stellte sich heraus, dass die beschaffte Hardware nicht allen Anforderungen gerecht wird. Das Hauptproblem besteht darin, dass der Signalgenerator während der Generierung eines Signals nicht mit neuen Informationen bzw. Signalformen beschrieben werden kann. Bei der Generierung von einem konstanten unmodulierten Träger und dem Wechsel zum modulierten Signal muss der Generator zunächst angehalten und eine neue Signalform in den Speicher des Signalgenerators geladen werden. Dies führt zu einer Unterbrechung im Signalfluss.

Um dieses Problem zu beseitigen, werden die Kommandos als Burst (in einer einmaligen Sequenz) gesendet. Da der Satellitenempfänger eine gewisse Zeit zum Einloggen benötigt, wird die IDLE-Sequenz auf 32 Byte verlängert. Das abgeänderte Telekommando sieht wie folgt aus:

32 Byte IDLE x55	2 Byte Sync. xEB x90	80/102/252 Byte
------------------	----------------------	-----------------

Abbildung 4.5: Telekommandoformat mit verlängertem IDLE

Dieses Signal wird in den Generator geladen und einmal gesendet. Sollen mehrere Kommandos gesendet werden (nur mit dem realen Satellitenempfänger möglich), müssen die Einzelkommandos nacheinander in die Datei geschrieben werden. Die verlängerte IDLE-Sequenz wird aber nur vor das erste Kommando gestellt. Die darauf folgenden Kommandos haben wieder die normale Struktur.

Um die Anforderung der $x55_{hex}$ (IDLE) Sequenz zu gewährleisten, wird eine 16 Byte lange 01010101 Folge moduliert, in den Speicher des Generator geladen und anschließend in einer Endlosschleife gesendet.

4.1.3 Frontpanel (GUI) und Funktionsbeschreibung

Sendeseite

Die GUI für den Sender (Abbildung 4.6) bietet die Möglichkeit, Telekommandos auszuwählen und zu senden sowie eine dauerhaften IDLE Sequenz zu senden.

Das Feld „File Config“ dient dazu, die Datei mit den Telekommandos auszuwählen und zu laden. Dazu wird die Datei ausgewählt und anschließend der Button „READ COMMAND“ (1.) gedrückt, ist die Datei leer oder fehlerhaft, gibt die Statusanzeige „FILE

4.1 Sender (Uplink)

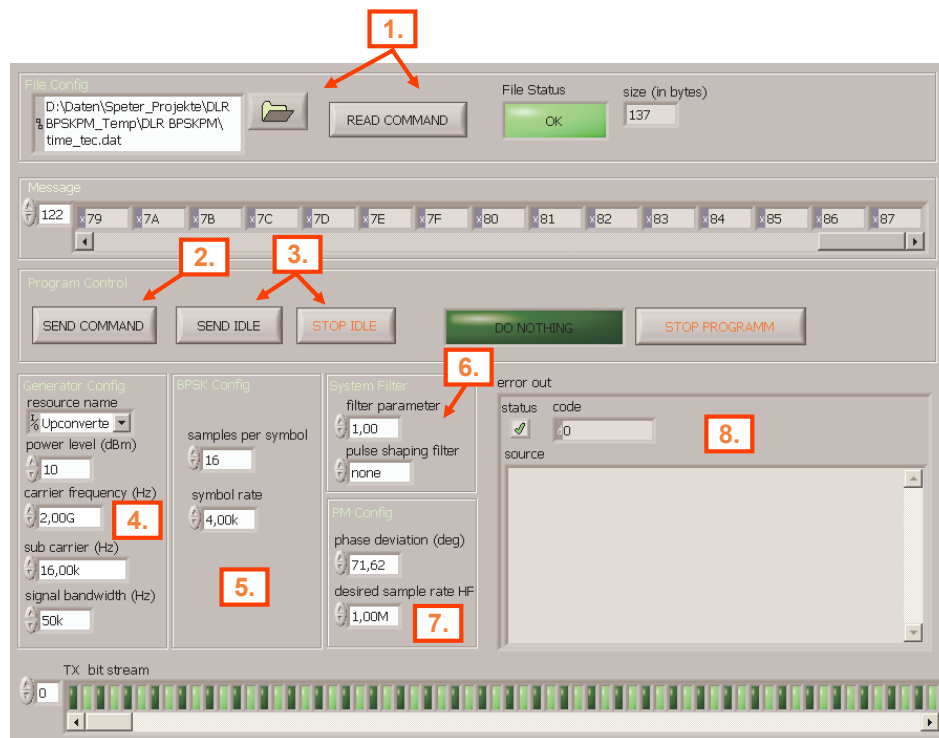


Abbildung 4.6: Frontpanel (GUI) des Senders

STATUS“ einen Fehler aus. Darüber hinaus wird die Länge des Kommandos in Byte ausgegeben. Das eingelesene Kommando wird hexadezimal im Feld „Message“ angezeigt.

Im Feld „Programm Control“ gibt es den Button „SEND COMMAND“ (2.), dieser ist nur auswählbar, wenn ein Kommando korrekt eingelesen wurde, andernfalls ist dieser Button grau hinterlegt und kann nicht gedrückt werden. Ist das Kommando korrekt eingelesen worden, wird mittels dieses Buttons das eingelesene Kommando einmal gesendet. Während des Sendens zeigt die Statusanzeige dies an und es wird das gesendete Kommando als Bitstream angezeigt. Der Button „SEND IDLE“ (3.) dient dazu, eine $x55_{hex}$ (IDLE) Sequenz dauerhaft zu senden, bis der Button „STOP IDLE“ (3.) oder „STOP PROGRAMM“ gedrückt wird.

Vor dem Senden kann im Feld „Generator Config“ der Name des Generators und des Upconverters ausgewählt werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den Pegel, die Trägerfrequenz und die Frequenz des Unterträgers für die PM zu verändern. Im Feld „BPSK Config“ besteht die Möglichkeit, die Symbolrate und die Samplerate für die Symbole einzustellen. Das Feld „System Filter“ bietet die Möglichkeit, eine Impulsformung der digitalen Signale durchzuführen. Dazu stehen einige gängige Filter zur Verfügung

4.1 Sender (Uplink)

wie beispielsweise der „Wurzel Kosinus Filter“. Da für diese Arbeit keine Filter benötigt werden, ist dieses Modul unbenutzt. Der Phasenhub für die Phasenmodulation kann im Feld „PM Config“ eingestellt werden. Der Parameter für die „Samplerate HF“ ist auf einen Wert von 1MS/s eingestellt. Dieser Wert bestimmt die Anzahl der Abtastpunkte des PM modulierten Signals im Zwischenfrequenzband vor der Mischung auf den Träger. Alle Einstellungsmöglichkeiten dienen vorrangig der Anpassung an unterschiedliche Projekte, für diese Arbeit sind alle Werte fest eingestellt und vorkonfiguriert, so dass keine Änderungen vorgenommen werden müssen.

Im Feld „Error out“ werden eventuelle Fehler des Programms ausgegeben.

Empfangsseite (Simulation des Satellitenempfängers)

Die Empfängerseite dient vorrangig zur Überprüfung des Senders, da während der Durchführung dieser Arbeit der eigentliche Satellitenempfänger nicht zur Verfügung stand. Dieses Modul empfängt einen Datenstrom über eine bestimmte Länge und gibt diesen hexadezimal auf dem Bildschirm aus. Auf diese Weise kann einfach überprüft werden, ob die Daten korrekt übermittelt wurden. Das Frontpanel (GUI) ist in Abbildung 4.7 zu sehen.

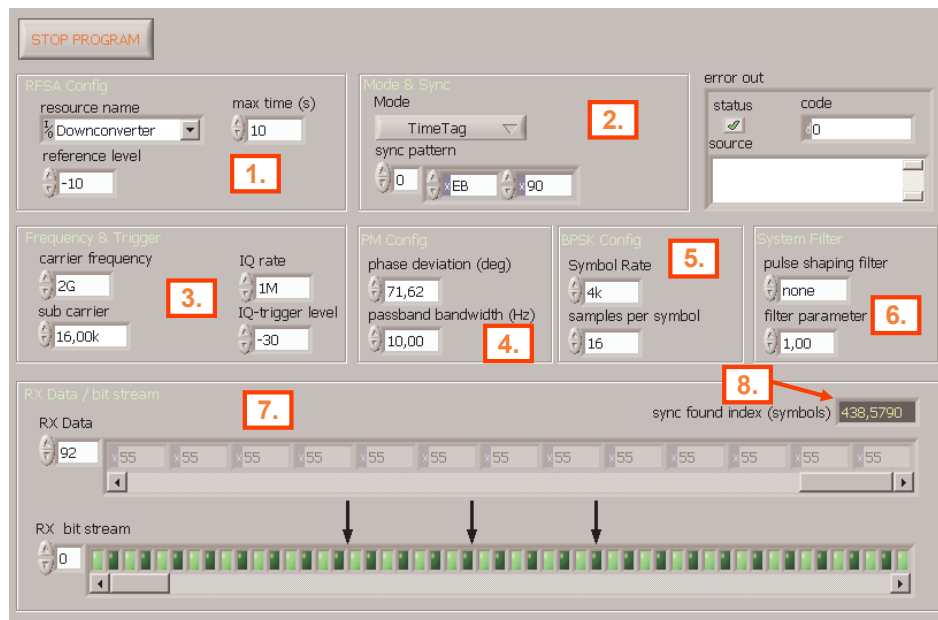


Abbildung 4.7: Frontpanel (GUI) des simulierten Empfängers für den Sender

Es sind Einstellungsmöglichkeiten zur Modulation, zum Filter sowie zur Träger- /Unter-

trägerfrequenz vorhanden. In dem Feld „RFSA Config“ (1.) besteht die Möglichkeit, den Downconverter und den Digitizer sowie das Referenzlevel der Eingangsleistung einzustellen. Die Variable „max time“ definiert die maximale Zeit, in welcher der Empfänger auf ein Signal wartet, bevor er die Schleife zum Empfang abbricht. Dies ist notwendig, da ein kontinuierliches Empfangen bzw. Warten auf Signale nicht realisierbar ist. Die Ursache dafür ist das Verfahren, mit welchem das Gerät arbeitet.

Im Falle eines Schleifenbetriebes liest der Empfänger die Daten stückweise ein und demoduliert diese. Das hat zur Folge, dass in einigen Fällen das gesendete Signal auf zwei Zeitabschnitte geteilt ist. Würde der Empfänger zum Beispiel ein Signal empfangen, demodulieren und in einem Array ausgeben, wird nur der erste Teil der gesendeten Daten in diesem Array vorliegen und es könnte nicht der gesamte Datenstrom ausgegeben werden, da im nächsten Durchlauf dieses Array komplett überschrieben wird.

Um dieses Problem zu beseitigen, wurde festgelegt, dass immer nur ein Kommando pro Datei vorhanden sein darf. Des Weiteren muss beim Empfänger der Mode (2.) eingestellt werden, welche Art von Telekommandos gesendet werden. Es steht die Auswahl „time tag“, „immediate“ und „data upload“ zur Verfügung. Dies ist notwendig, um die maximale Länge des zu empfangenden Signals zu definieren. Dieser Kompromiss ist nur bei der Kommunikation mit dem simulierten Empfänger notwendig, bei dem realen Satellitenempfänger können die Kommandos hintereinander gesendet werden, da die Art der Demodulation eine andere ist.

Wie beim Sender sind alle Parameter voreingestellt, aber es besteht die Möglichkeit, diese anzupassen. Im Feld „Mode & Sync“ kann über die Auswahl des Empfangsmodes hinaus die Synchronisationssequenz angegeben werden, dies geschieht hexadezimal. Wird ein Signal korrekt empfangen und demoduliert, wird der empfangene Datenstrom hexadezimal im Feld „RX Data / bitstream“ (7.) ausgegeben. Zusätzlich wird die Position der Synchronisationssequenz ausgegeben (8.).

4.1.4 Blockschaltbild

In diesem Abschnitt werden einzelne Programmabläufe und deren VI's näher erläutert. Die kompletten Blockdiagramme befinden sich im Anhang.

Sendeseite

Das Programm besteht aus zwei VI's, dem Hauptprogramm (Main-VI) und einem Unterprogramm (Sub-VI). In dem Main-VI werden die Kommandos aus den Dateien eingelesen und moduliert. Die Sub-VI ist für die hardwareseitige Verarbeitung zuständig.

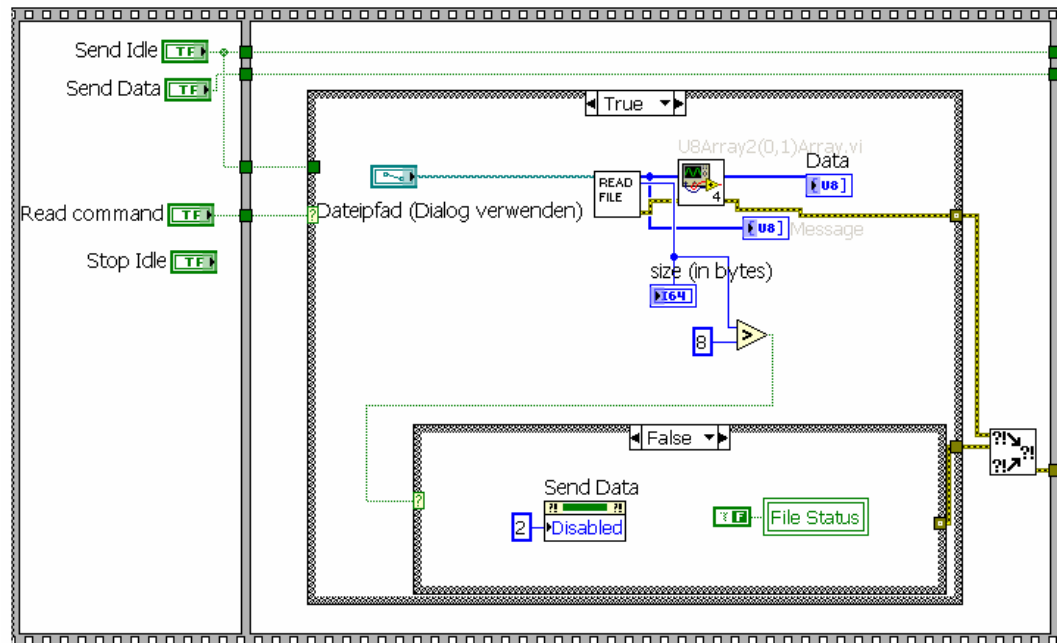


Abbildung 4.8: Blockdiagramm der Sendeseite / Dateien einlesen

Abbildung 4.8 zeigt den für das Einlesen der Kommandos aus einer Datei verantwortlichen Teil des Hauptprogramms. Der Programmablauf liegt in einer sequenziellen Struktur. Damit wird sichergestellt, dass die Programmteile in der richtigen Reihenfolge gestartet werden. Zunächst werden die Buttons für das Senden der Kommandos und der IDLE-Sequenz sowie das Stoppen der IDLE-Sequenz definiert. Im nächsten Sequenzabschnitt werden diese Buttons abgefragt. Wird der Button „Read Command“ gedrückt, wird die Caseschleife auf „true“ (wahr) gestellt. Dort wird die Datei, sofern ein Dateiname angegeben wurde, eingelesen. Ist der Inhalt dieser Datei kleiner als 8 Byte, wird ein Fehler ausgegeben. Ist die Datei richtig eingelesen und der Inhalt korrekt, wird der „File-Status“ auf OK gesetzt und der Button „Send Command“ freigegeben. Das Kommando aus der Datei wird an das Frontpanel (GUI) weitergeleitet und angezeigt.

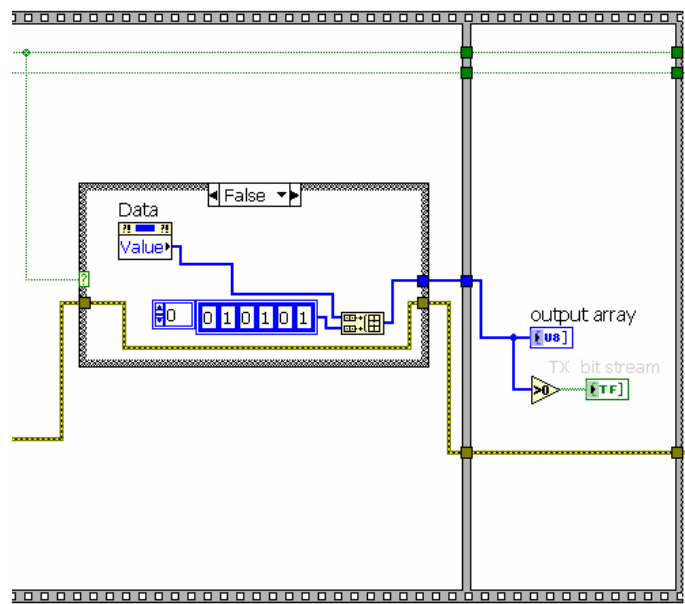


Abbildung 4.9: Blockdiagramm der Sendeseite / Daten verarbeiten

Die nächsten Sequenz verarbeitet den Fall, dass der „Send IDLE“ Button gedrückt ist. Im Falle von Flase (Falsch) wird an das zuvor eingelesene Kommando am Ende 2 mal eine $x55_{hex}$ - Folge angehängt. Dies dient der Sicherheit, um beim Empfänger sicherzustellen, dass der komplette Datenstrom übertragen wurde. Ist der „Send IDLE“ Button gedrückt, wird eine Sequenz von 16 Byte $x55_{hex}$ (IDLE) generiert. In beiden Fällen wird das Array als Variable gespeichert, damit es an andere Programmteile übergeben werden kann.

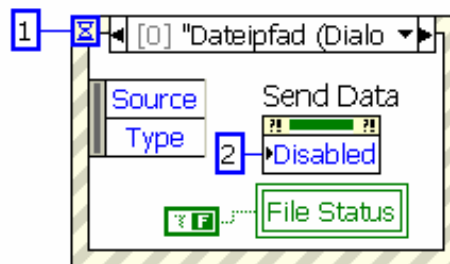


Abbildung 4.10: Blockdiagramm der Sendeseite / Button zurücksetzen

Die in Abbildung 4.10 dargestellte Funktion deaktiviert den „Send Data“ Button wieder, wenn „Send IDLE“ gedrückt wird oder Daten aus einer Datei erneut eingelesen wurden. Es soll weiterhin sicherstellen, dass der „Read Command“ Button gedrückt wird, damit nach einer Änderung der Datei bzw. des Dateinamens das Kommando richtig in den Speicher eingelesen wird.

An dieser Stelle werden die BPSK - Systemparameter definiert und die Kommandos

4.1 Sender (Uplink)

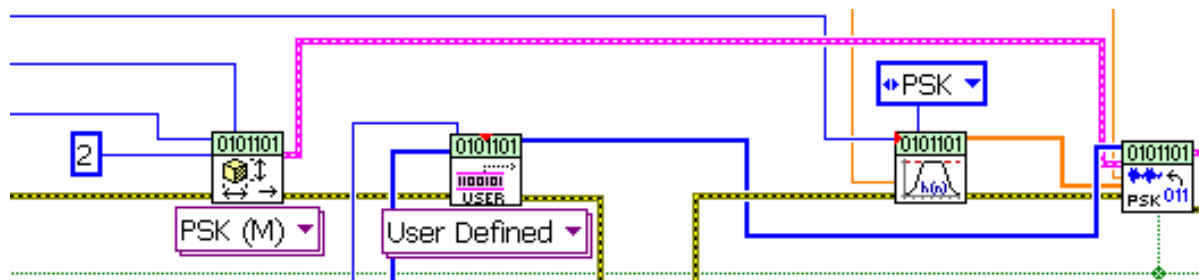


Abbildung 4.11: Blockdiagramm der Sendeseite / BPSK Systemparameter und Modulation

oder die „IDLE“-Sequenz mit Hilfe des Bitstromgenerators verarbeitet. Diese Daten und Parameter werden an den BPSK-Modulator übergeben, welcher die Modulation durchführt.

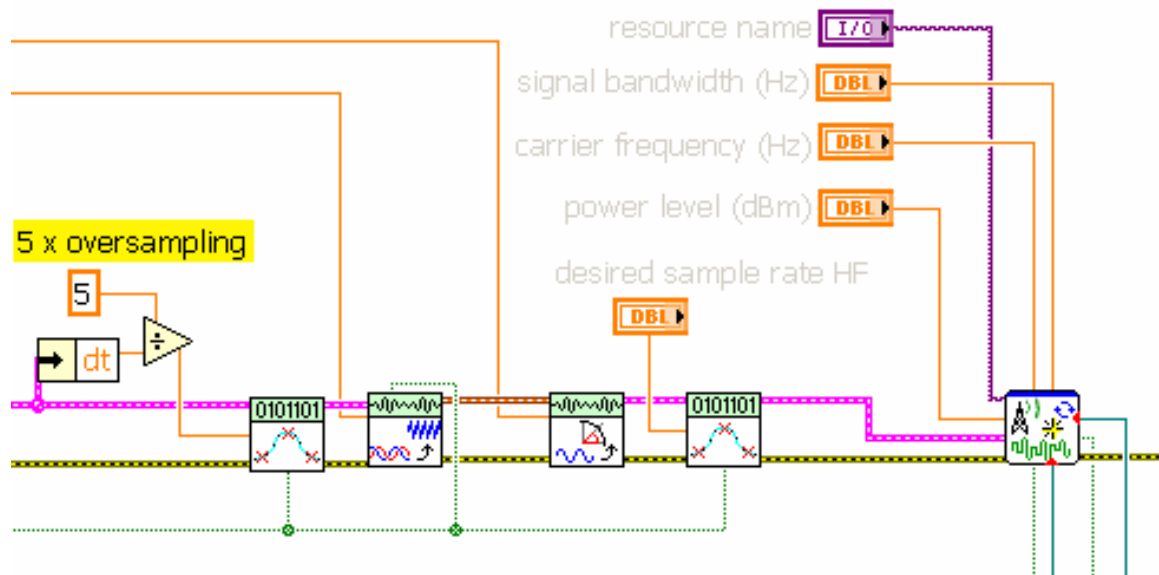


Abbildung 4.12: Blockdiagramm der Sendeseite / PM

Im nächsten Schritt wird die zuvor BPSK modulierte Signalform 5-fach überabgetastet und an einen Software seitigen Upconverter übergeben. Dieser mischt das Signal auf den Unterträger von 16kHz . Dieses Passbandsignal wird anschließend phasenmoduliert und wiederum abgetastet. Das PM BPSK modulierte Signal sowie die Parameter zur Steuerung der Hardware werden an das Sub-VI übergeben.

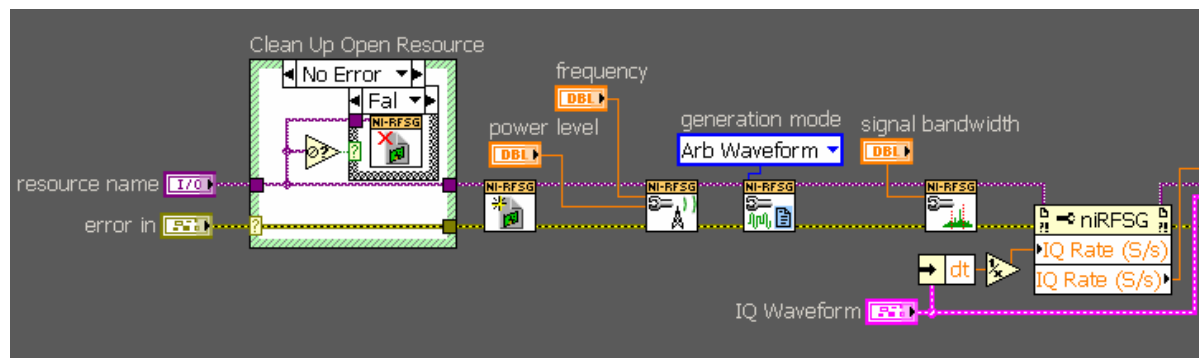


Abbildung 4.13: Sub-VI der Sendeseite / Systemparameter für die Hardware

Der erste Teil des Unterprogramms (Abbildung 4.13) dient der Erfassung der Systemparameter für die Hardwarekomponenten. Es wird der Name der Hardware, mit welchem gearbeitet werden soll, erfasst. Dieses Gerät wird im ersten Schritt zurückgesetzt. Damit wird sichergestellt, dass sich die Hardware im Urzustand befindet. Das anschließende „öffnen“ des Gerätes bedeutet, dass es bereit ist, mit dem PC zu kommunizieren. Darüber hinaus werden Parameter zur Frequenz und zum Leistungspegel der zu generierenden Signalform abgefragt.

Es besteht die Möglichkeit, eine Continuous Waveform (CW) oder eine Arbitrary Waveform (AW) zu generieren. Bei der CW sind die Parameter Frequenz und Amplitude fest definiert, bei der AW besteht die Möglichkeit, freie Signalformen zu generieren. Da für die Modulation eine beliebige Signalform genutzt wird, muss der Generator auf AW eingestellt werden. Die Signalbandbreite legt fest, in welchem minimalen und maximalen Frequenzbereich sich das Signal bewegt.

Aus der im Hauptprogramm generierten Signalform wird die Abtastrate ermittelt und an das Gerät weitergeleitet. Damit wird sichergestellt, dass das Gerät mit der selben Abtastrate arbeitet.

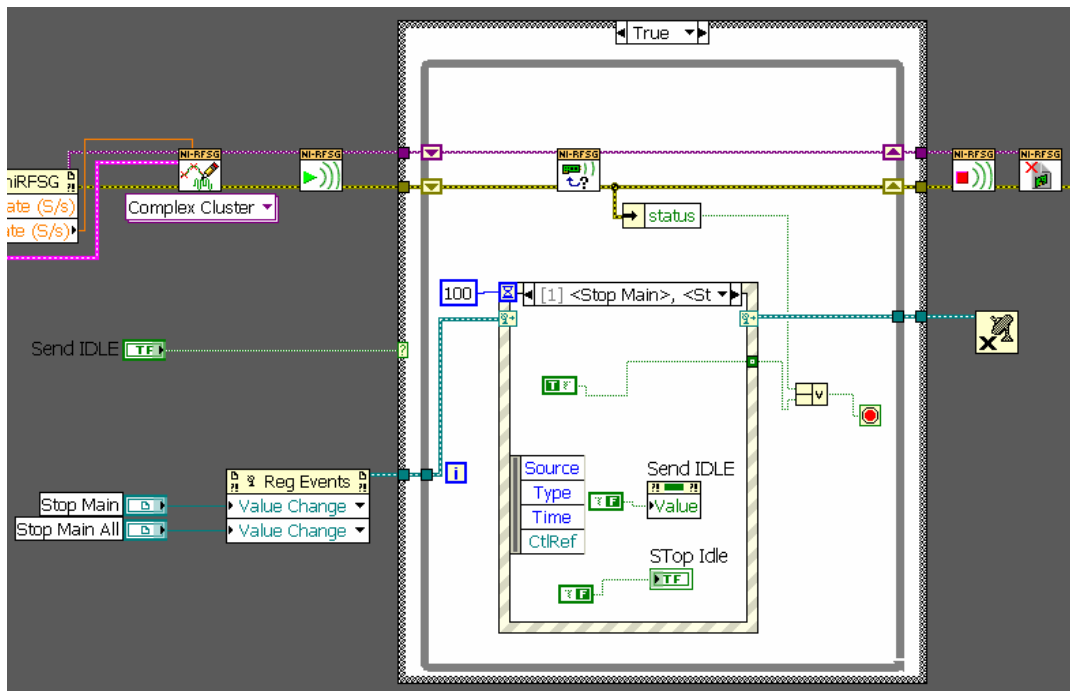


Abbildung 4.14: Sub-VI der Sendeseite / Signalgeneration

Abschließend wird die aus dem Hauptprogramm übergebene Signalfom neu abgetastet und in den Speicher des Signalgenerators geschrieben, danach wird die Generation dieser Signalfom gestartet. Die Case-Schleife selektiert zwischen einmaligen Senden des Signals (Daten) oder als dauerhafte Schleife (IDLE). Dazu wird der Button „Send IDLE“ aus dem Hauptprogramm abgefragt. Ist dieser „true“ (wahr) wird die eingelese Signalfom solange wiederholt, bis das Programm oder das Senden von „IDLE“ gestoppt wird. Die Übernahme von Parametern aus dem Hauptprogramm erfolgt mit Hilfe von Registern, welche auch im Unterprogramm abgefragt werden können.

Empfangsseite (Simulation des Satellitenempfängers)

Das Programm für die Empfangsseite ist in Hauptprogramm (Haupt-VI) und Unterprogramm (Sub-VI) unterteilt. Im Hauptprogramm werden sämtliche Parameter für die Hardware und die Modulation erfasst. Darüber hinaus wird im Hauptprogramm die Demodulation durchgeführt. Das Unterprogramm dient zur Steuerung der Hardware.

4.1 Sender (Uplink)

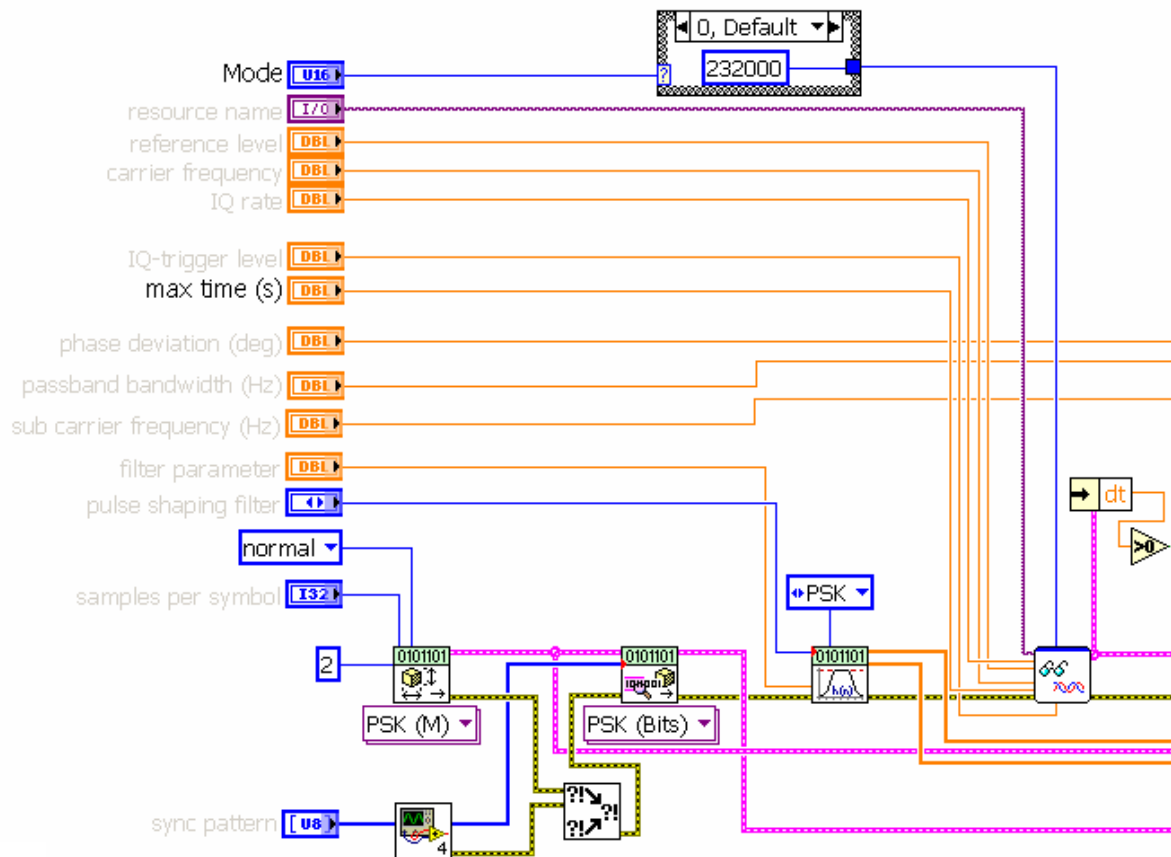


Abbildung 4.15: Main-VI der Empfangsseite / Einlesen der Parameter und Einstellungen zur Demodulation

Über die Erfassung der Parameter für die Hardware hinaus werden die Systemparameter für die Demodulation definiert und erfasst. Dazu wird für die PSK der Modulationsgrad auf 2. eingestellt. Es werden auch die Synchronisationsparameter erfasst. Dazu wird die Synchronisationssequenz hexadezimal eingelesen und in einen Bitstrom gewandelt. Dieser Bitstrom wird an das Modul für die Synchronisationsparameter übergeben. Das Modul zur Filterung des Digitalsignals ist notwendig für den Demodulator und für eventuell spätere Nutzung.

Der Auswahlbutton zum Mode der zu empfangenden Signale wird mit einer Case-Schleife verbunden, in welcher je nach Mode die Länge des zu empfangenden Signals definiert wird. Damit wird bestimmt, wie lange eingehende Signale in den Speicher gelesen werden bzw. wie groß der Speicher vordefiniert werden muss.

Die eingelesene Signalform wird, nachdem sie aus dem Unterprogramm ausgegeben wur-

4.1 Sender (Uplink)

de, auf den Gehalt von Informationen untersucht. Ist die Länge des Signals größer Null, wird die Case-Schleife (Abbildung 4.16) aktiviert und das Signal wird demoduliert.

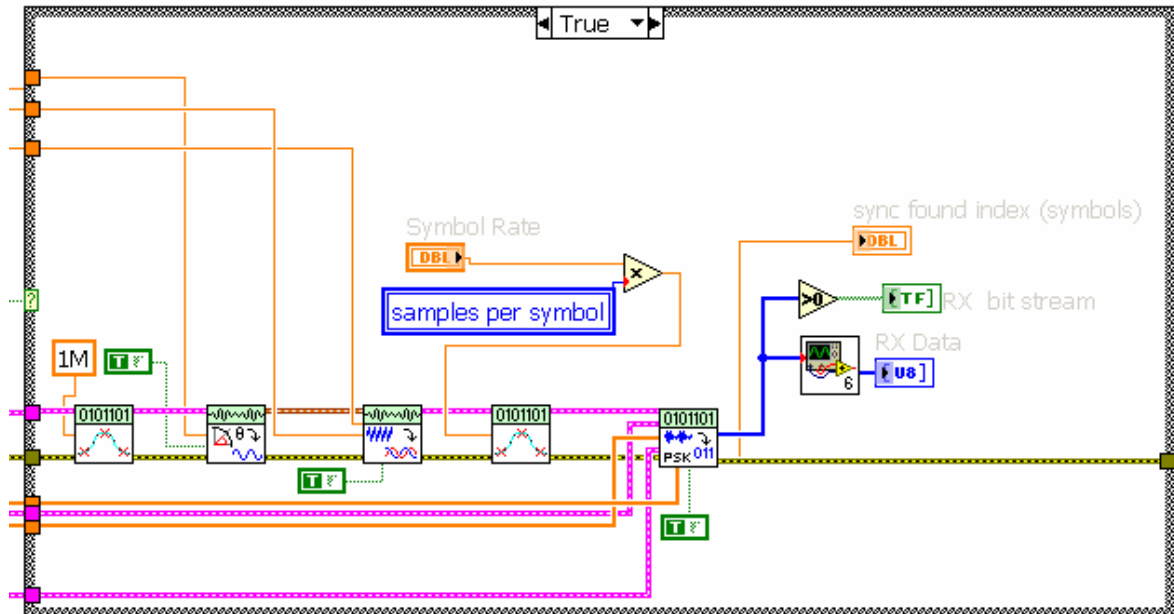


Abbildung 4.16: Main-VI der Empfangsseite / Demodulation und Ausgabe der Informationen

Wurde eine Signalform erkannt, wird sie zunächst mit einer Samplerate von 1MHz abgetastet und an den Phasen-Demodulator übergeben. Dieses demodulierte Signal wird mit einem Downconverter in das Basisband von dem 16kHz Unterträger zurück transformiert. Anschließend wird dieses Basisbandsignal mit dem Produkt aus Symbolrate und Samples pro Symbol erneut abgetastet und an den BPSK-Demodulator übergeben. Das demodulierte Signal wird sowohl hexadezimal als auch binär zur Anzeige an das Frontpanel übergeben.

Im Unterprogramm werden nach dem Zurücksetzen des Gerätes und der Erfassung des Gerätenamens die Systemparameter für das Gerät erfasst (Abbildung 4.17). Die Form der Erfassung der eingehenden Signale wird definiert. Als Format wird „IQ“ (In-Phase, Quadratur-Phase) gewählt, da der Demodulator die Signale in dieser Form benötigt.

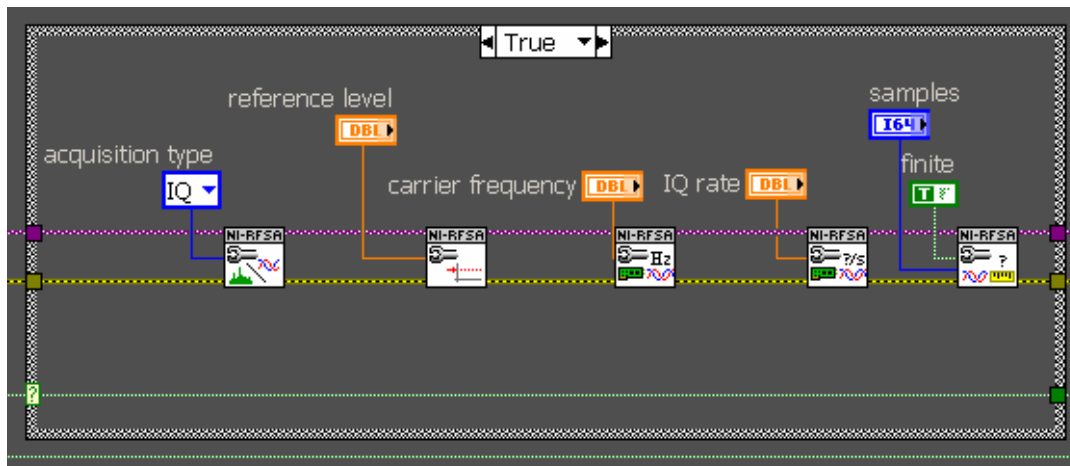


Abbildung 4.17: Sub-VI der Empfangsseite / Erfassung der Systemparameter

Die Parameter des Referenzpegels des eingehenden Signals sowie der Wert für die Trägerfrequenz werden abgefragt. Die „IQ rate“ bestimmt die Anzahl der Abtastpunkte für das Signal. Diese „IQ rate“ ist nicht die Abtastrate der Trägerfrequenz, sondern die der internen Frequenz des Gerätes. Weiterhin wird die Länge des eingehenden Signals begrenzt bzw. definiert. Es werden die Werte vom zuvor definierten Mode abgefragt und verarbeitet. Dieses Verfahren ist notwendig, da nur so eine Demodulation möglich ist. Bei einem kontinuierlichen Empfang ist eine Überprüfung der Übertragung nicht möglich, da das eingelesene bzw. demodulierte Signal in ein Array übertragen wird, welches permanent überschrieben wird.

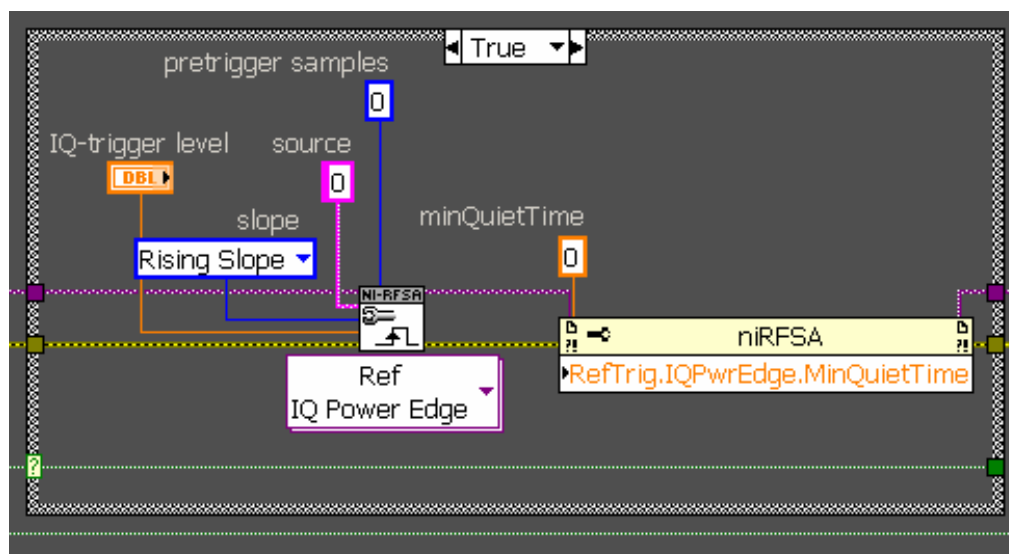


Abbildung 4.18: Sub-VI der Empfangsseite / Einstellungen für den Trigger

4.2 Empfänger (Downlink)

Der Empfänger soll Telemetriedaten vom Satelliten empfangen. Der Satellit sendet zwei grundlegende Daten, die „Housekeeping-Daten“, welche Informationen zum Status des Satelliten beinhalten (zum Beispiel Ladezustand der Batterien und Lage des Satelliten) und Daten, die der Satellit aufzeichnet (zum Beispiel Fotos). Der prinzipielle Aufbau des Testsystems ist in Abbildung 4.20 zu sehen. Da, wie auch beim Sender, keine Satellitenhardware während der Arbeit zur Verfügung stand, wird der Satellitensender simuliert.

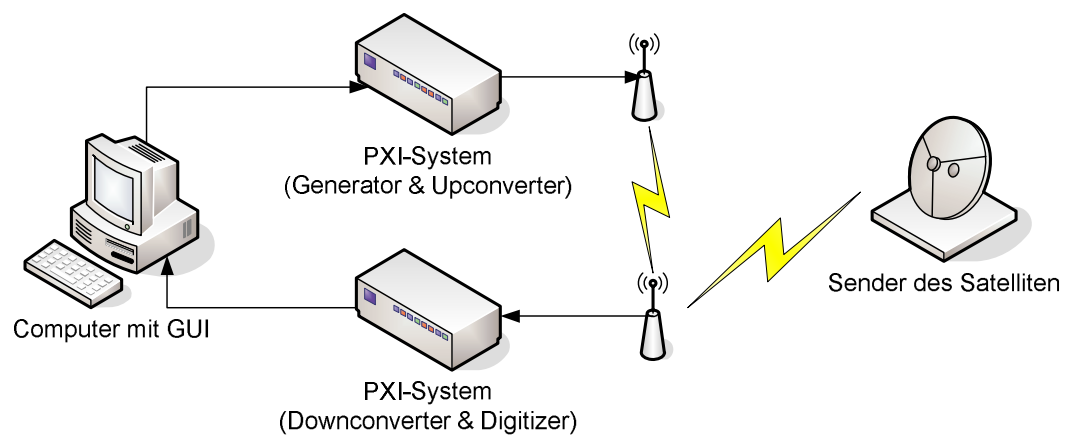


Abbildung 4.20: Aufbau de Testsystems (Empfänger)

4.2.1 Zusammenfassung der Anforderungen

Die Anforderungen an den Empfänger des Testsystems sind folgende:

- Es müssen zwei Übertragungsgeschwindigkeiten unterstützt werden. Eine „low-rate“ mit einer Symbolrate von $137,5\text{kHz}$ und eine „high-rate“ mit einer Symbolrate von $2,2\text{MHz}$.
- Als Modulation wird eine BPSK verwendet.
- Die empfangenden Daten müssen zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt und angezeigt werden.
- Für die „high-rate“ soll ein kontinuierlicher Datenempfang möglich sein.

Das Datenformat sieht wir folgt aus:

16 Byte IDLE x55	4 Byte Sync. x1A xCF xFC x1D	512 Byte Data
------------------	------------------------------	---------------

Abbildung 4.21: Telemetrieformat

4.2.2 Technisch bedingte Einschränkungen der Anforderungen

Ein kontinuierlicher Datenempfang ist mit der benutzten Hardware nicht realisierbar, da das Gerät die Daten schubweise bzw. für eine definierte Zeit einliest. Ein kontinuierlicher Empfang von Daten ist mit der Hardware theoretisch möglich, aber nur zum Anzeigen von Spektren oder zum Darstellen der Zeitfunktion. Für die Demodulation von Daten lässt sich dieses Verfahren nicht anwenden.

Um dieses Problem zu lösen, werden immer nur Einzelpakete vom Satelliten in die Testumgebung verschickt. Im Fall von „Housekeeping“ ist dies eher unkritisch, da es immer nur ein Paket ist. Beim Empfang von Daten werden in der Testumgebung die Testdaten in ihrer Größe so beschränkt, dass sie nur ein Paket benötigen.

4.2.3 Frontpanel (GUI) und Funktionsbeschreibung

Sendeseite (Simulation des Satellitensenders)

Für den simulierten Satellitensender ist die GUI in Abbildung 4.22 zu sehen. Im Aufbau ähneln sie dem Sender (Uplink). Es besteht die Möglichkeit, Testdaten aus einer Datei einzulesen und für das Senden zur Verfügung zu stellen. Sind diese Daten korrekt eingelesen, können sie einmal als Burst (Impulse) gesendet werden. Die Gesamtdatenlänge beträgt 528 Byte und beinhaltet 16 Byte „IDLE“ und 4 Byte Synchronisationssequenz. Es besteht die Möglichkeit, die Trägerfrequenz, den Sendepiegel und die Symbolgeschwindigkeit (Übertragungsrate) einzustellen. Mit Hilfe des Dropdownmenüs kann zwischen „low-rate“ und „high-rate“ gewählt werden.

4.2 Empfänger (Downlink)

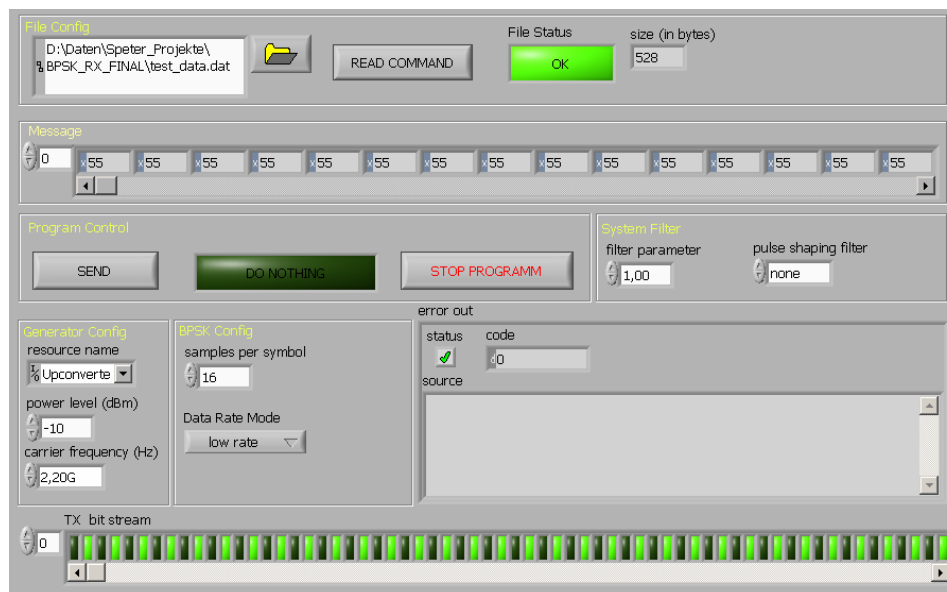


Abbildung 4.22: Frontpanel (GUI) des simulierten Senders für den Empfänger

Empfangsseite

Die GUI für den Empfänger ist in Abbildung 4.23 dargestellt.

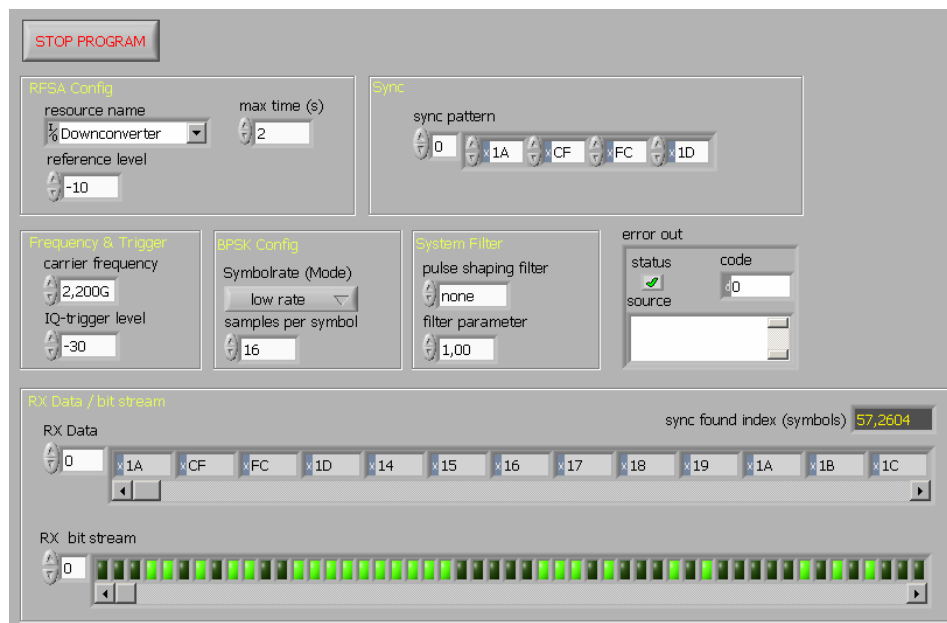


Abbildung 4.23: Frontpanel (GUI) des Empfängers

Als Einstellungsmöglichkeit steht die Wahl der Trägerfrequenz, des Triggerlevels, so-

wie der Geschwindigkeit („low-rate“, „high-rate“) zur Verfügung. Weiterhin kann die Synchronisationssequenz verändert werden. Für diese Arbeit sind alle Parameter voreingestellt. Der empfangende Datenstrom wird auf der GUI zur Anzeige gebracht und kann bei Bedarf weiter verarbeitet werden.

4.2.4 Blockschaltbild

Die Programme werden fast vollständig von dem Sender (Uplink) übernommen und angepasst. Es werden in diesem Abschnitt nur die wesentlichen Änderungen erläutert. Die Unterprogramme zur Steuerung der Hardware werden eins zu eins vom Sender (Uplink) übernommen, da dort keine Änderung notwendig ist. Die kompletten Programme befinden sich im Anhang.

Sendeseite (Simulation des Satellitensenders)

Beim simulierten Sender sind keine großen Änderungen im Vergleich zum Sender (Uplink) notwendig. Es werden lediglich die Modulationsarten geändert. Die PM sowie die Funktion für das Senden von „IDLE“ $x55_{hex}$ wird entfernt und eine „Case-Schleife“ (zur Auswahl der Übertragungsraten) eingefügt (Abbildung 4.24).

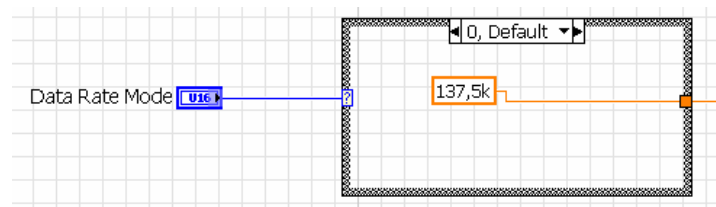


Abbildung 4.24: Case-Schleife zur Auswahl der Übertragungsgeschwindigkeit beim Sender

In Abhängigkeit der auf dem Frontpanel (GUI) gewählten Geschwindigkeit schaltet die „Case-Schleife“ um und übergibt an das Modul (VI) des BPSK-Modulators die entsprechende „Symbolrate“.

Empfängerseite

Die Änderung im Programm des Empfängers des Senders besteht in der Entfernung der PM und der Hinzufügung einer „Case-Schleife“. Letztere dient zum Auswählen des Modus der Übertragungsgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit des Datenempfangs wird

über das „Dropdownmenü“ ausgewählt. Diese Auswahl beeinflusst die Schleife zur Definition der „Symbolrate“ (Abbildung 4.25).

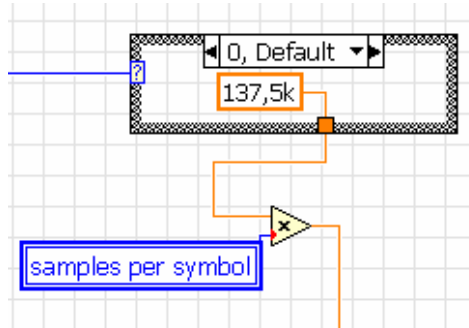


Abbildung 4.25: Case-Schleife zur Auswahl der Übertragungsgeschwindigkeit beim Empfänger

Wird eine „Symbolrate“ ausgewählt, bestimmt diese den Parameter für die Abtastung des Signals. Dazu wird die „Symbolrate“ mit 5 multipliziert. Dies ist notwendig, damit der Demodulator ausreichend viele Werte für die Demodulation zur Verfügung hat.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der Satellitenentwicklung ist es unerlässlich, möglichst viele mögliche Ereignisse vorab zu überprüfen und ausführlich zu testen. Das HF-Testsystem sollte daher in der Lage sein, eine reale Bodenstation nachzustellen.

Die Diplomarbeit hatte das Ziel, dieses mit einem möglichst offenen HF-System zu erreichen. Das System soll in der Lage sein, Telekommandos an den Satelliten zu senden und Daten vom Satelliten zu empfangen. Um das HF-Testsystem auch für andere Satellitenprojekte nutzen zu können, sollte es gut anpassbar gestaltet werden.

Während der Realisierung wurde jedoch festgestellt, dass die zur Verfügung stehende Hardware diesen Anforderungen nicht gerecht werden konnte. Dies lag an der sehr komplizierten Programmierung sowie an der Hardware selbst. Ein Hauptproblem war die Umsetzung eines konstanten HF-Trägers, auf den Daten live moduliert werden sollten. Das Gerät bot keine Möglichkeit, Signale während der Generation zu verändern. Die Signalform musste vor dem Generieren der Signale feststehen. Dieses Problem konnte mit Hilfe eines Kompromisses umgangen werden, in dem die Daten als Burst gesendet wurden. Dazu wurden vor dem Telekommando und der Synchronisationssequenz zusätzliche „IDLE“-Bytes eingefügt, um sicherzustellen, dass der Satellitenempfänger ausreichend Zeit hat, sich auf den Träger einzuloggen.

Größere Probleme entstanden beim Empfänger, da hier das System ähnlich arbeitet wie der Signalgenerator. Ziel war es, Daten kontinuierlich zu empfangen und in eine Datei zu schreiben oder via Netzwerk an eine andere Arbeitsstation weiter zu leiten. Dies war nicht zu realisieren. Das Problem bestand darin, dass der Demodulator die demodulierten Daten immer stückweise ausgegeben hat. Dadurch werden demodulierte Datenstücke einer zusammenhängenden Information voneinander getrennt. Da dieses Array aber immer wieder überschrieben wurde, war es nicht möglich diese Daten korrekt zu speichern. Um dies zu realisieren, müsste das eingehende Signal bitweise demoduliert werden. Der Kompromiss besteht darin, die Daten immer nur paketweise zu verschicken. Es muss aus-

reichend Zeit zwischen den Paketen verstreichen, bis das nächste Paket gesendet wird. So war es möglich, die Zeit zum Einlesen der eingehenden Signale so zu wählen, dass sie der Länge der Information entsprach.

Trotz der Kompromisse ist das realisierte System gut als Testsystem geeignet, wenn auch nicht im vollen Funktionsumfang. Für spätere Projekte wäre eine andere Hardware sinnvoll.

Während dieser Arbeit wurde zeitweise mit den Bodenstationen des DLR in Neustrelitz zusammengearbeitet. Das von ihnen verwendete System für die Modulation und Demodulation bietet alle Eigenschaften, die auch für das Testsystem notwendig sind. Es wird über Netzwerkverbindung an einen PC angeschlossen und kann darüber Daten austauschen. Es unterstützt die benötigten Modulationsarten, welche mit Hilfe eines Touchscreens am Gerät voreingestellt werden. Bei späteren Projekten wäre die Anschaffung dieser Hardware sinnvoll. Die Vorteile liegen einerseits in einer leichten Konfigurierbarkeit und zum anderen in der Nutzbarkeit der Erfahrungswerte von den Bodenstationen. Mit diesem System hätte man eine sehr offene und leicht anpassbare Hardware.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Telekommando Format	5
2.2	PXI - System	6
2.3	Aufbau einer Übertragungsstrecke	9
2.4	Zeitfunktion einer BPSK für eine Sequenz 1 0 1 0 1 0 1	11
2.5	Zustandsdiagramm einer BPSK	11
2.6	Spektrum einer BPSK	12
2.7	BPSK-Modulator	12
2.8	Squaring Loop	13
2.9	Costas Loop Regelschleife [MG02]	13
2.10	Phasenwinkel und Frequenz bei der winkelmodulierten Schwingung abhängig vom modulierenden Signal [Mäu92]	15
2.11	Wechselanteil des Momentanphasenwinkels und der Momentanfrequenz im Zusammenhang mit dem Pendelzeigerdiagramm [Mäu92]	17
2.12	Zeitfunktion einer Phasenmodulation	18
2.13	Verschiedene Spektren einer Phasenmodulation mit verschiedenen Phasenhüben	18
3.1	Modul für die Generierung der Systemparameter	20
3.2	Modul für die Generierung von Testdaten	20
3.3	Modul für die Synchronisationsparameter	21
3.4	Modul für die Generierung der BPSK	21
3.5	Modul für die Demodulation der BPSK	22
3.6	Modul für die Generierung der PM	22
3.7	Modul für die Demodulation der PM	22
3.8	Modul für den Aufwärtsmischer (Upconverter)	23
3.9	Modul für den Abwärtsmischer	23
3.10	Modul für die Abtastung	23
3.11	Blockschaltbild vom Modulator des Senders für die Simulation	25

3.12	Ablaufplan vom Modulator des Senders für die Simulation	26
3.13	Blockschaltbild vom Demodulator des Senders für die Simulation	26
3.14	Ablaufplan vom Demodulator des Senders für die Simulation	27
3.15	Frontpanel des Senders (Eingabemaske)	28
3.16	Binäre Anzeige der Sende- und Empfangsdaten (Simulation des Senders)	28
3.17	Spektrum BPSK PM der Simulation	29
3.18	Blockschaltbild vom Modulator des Empfängers für die Simulation	30
3.19	Ablaufplan vom Modulator des Empfängers für die Simulation	31
3.20	Blockschaltbild vom Demodulator des Empfängers für die Simulation . .	32
3.21	Ablaufplan vom Demodulator des Empfängers für die Simulation	32
3.22	Frontpanel des Empfängers (Eingabemaske)	33
3.23	Spektrum BPSK (Simulation des empfängers)	34
3.24	Binäre Anzeige der Sende- und Empfangsdaten (Simulation des Empfän- gers)	34
4.1	Aufbau des Testsystems (Sender)	35
4.2	Telekommando Format für Immediate	36
4.3	Telekommando Format für Time Tag	36
4.4	Telekommando Format für Data Upload	36
4.5	Telekommandoformat mit verlängertem IDLE	37
4.6	Frontpanel (GUI) des Senders	38
4.7	Frontpanel (GUI) des simulierten Empfängers für den Sender	39
4.8	Blockdiagramm der Sendeseite / Dateien einlesen	41
4.9	Blockdiagramm der Sendeseite / Daten verarbeiten	42
4.10	Blockdiagramm der Sendeseite / Button zurücksetzen	42
4.11	Blockdiagramm der Sendeseite / BPSK Systemparameter und Modulation	43
4.12	Blockdiagramm der Sendeseite / PM	43
4.13	Sub-VI der Sendeseite / Systemparameter für die Hardware	44
4.14	Sub-VI der Sendeseite / Signalgeneration	45
4.15	Main-VI der Empfangsseite / Einlesen der Parameter und Einstellungen zur Demodulation	46
4.16	Main-VI der Empfangsseite / Demodulation und Ausgabe der Informa- tionen	47
4.17	Sub-VI der Empfangsseite / Erfassung der Systemparameter	48
4.18	Sub-VI der Empfangsseite / Einstellungen für den Trigger	48
4.19	Sub-VI der Empfangsseite / Einlesen der Signale und Fehlerbehandlung .	49

4.20	Aufbau de Testsystems (Empfänger)	50
4.21	Telemetrieformat	51
4.22	Frontpanel (GUI) des simulierten Senders für den Empfänger	52
4.23	Frontpanel (GUI) des Empfängers	52
4.24	Case-Schleife zur Auswahl der Übertragungsgeschwindigkeit beim Sender	53
4.25	Case-Schleife zur Auswahl der Übertragungsgeschwindigkeit beim Empfänger	54

Literaturverzeichnis

- [DLR07] DLR: *Einrichtung Optische Informationssysteme*. Institutsfolder, 2007
- [Gmb08] GMBH, Astro Feinwerktechnik A.: *Beschaffungsspezifikation HF-System, S-Band Sender, Empfänger und RFDU*. 2008
- [Ins08] INSTRUMENS, National: *Internetseiten <http://www.ni.com/de/>*. 2008
- [MG02] MÄUSL, Rudolf ; GÖBEL, Jürgen: *Analoge und digitale Modulationsverfahren*. Hüthig Verlag Heidelberg, 2002
- [Mäu92] MÄUSL, Rudolf: *Analoge Modulationsverfahren*. Hüthig Verlag Heidelberg, 1992
- [Mäu95] MÄUSL, Rudolf: *Digitale Modulationsverfahren*. Hüthig Verlag Heidelberg, 1995
- [Vor93] VORMANN, Matthias: *Modulationsfrequenzanalyse von Motorengeräuschen (pdf)*. 1993

A Anhang

Erklärung zur Diplomarbeit

Ich versichere, dass ich meine Diplomarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Berlin, 05. Januar 2009

Andreas Speter